

# **Energiedissipation dynamisch beanspruchter Mauerwerkswände**

Doktorarbeit  
zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der Abteilung für Bauingenieurwesen  
der Ruhr-Universität Bochum

von

**Peter Buttmann**

Ludwigshafen

Bochum 1988



ENERGIEDISSIPATION DYNAMISCH BEANSPRUCHTER MAUERWERKSWÄNDE

Doktorarbeit  
zur  
Erlangung des Grades  
Doktor-Ingenieur  
der  
Abteilung für Bauingenieurwesen  
der Ruhr-Universität Bochum

von  
Peter Buttman  
Ludwigshafen

Bochum 1988



Doktorarbeit eingereicht am: 14.10.1988

Tag der mündlichen Prüfung: 27.01.1989

Berichter: Prof. Dr.-Ing. F. Stangenberg  
Prof. Dr.-Ing. K. H. Schrader



INHALTSVERZEICHNIS

Seite

|       |                                                  |    |
|-------|--------------------------------------------------|----|
| 1.    | Einleitung                                       | 1  |
| 2.    | Literaturübersicht und<br>Stand der Erkenntnisse | 4  |
| 3.    | Ziel der Arbeit                                  | 14 |
| 4.    | Lösungsansatz - Experiment                       | 16 |
| 4.1   | Begriffsbestimmung und Vorgehensweise            | 16 |
| 4.1.1 | Das logarithmische Dekrement                     | 17 |
| 4.1.2 | Die Resonanzkurve                                | 23 |
| 4.1.3 | Die Erregerkraft bei Resonanz                    | 26 |
| 4.2   | Versuchsaufbau                                   | 27 |
| 4.2.1 | Versuchstand                                     | 27 |
| 4.2.2 | Elektrische Einrichtung                          | 30 |
| 4.3   | Versuchskörper                                   | 35 |
| 4.3.1 | Herstellung der Mauerwerkswände                  | 41 |
| 4.3.2 | Herstellung der Stahlbetonwand                   | 41 |
| 4.3.3 | Herstellung des Triplexstabes                    | 45 |

|     |                                |     |
|-----|--------------------------------|-----|
| 5.  | Durchführung der Messungen     | 48  |
| 6.  | Versuchsergebnisse             | 51  |
| 6.1 | Ausgewählte Versuche           | 51  |
| 6.2 | Tabellarische Zusammenstellung | 83  |
| 7.  | Wertung der Versuchsergebnisse | 98  |
| 8.  | Zusammenfassung                | 107 |
| 9.  | Aufzeichnungen der Versuche    | 110 |
| 9.1 | Mauerwerkswände                | 110 |
| 9.2 | Stahlbetonwand                 | 190 |
| 9.3 | Triplexstab                    | 212 |
| 10. | Literaturverzeichnis           | 225 |

## 1. Einleitung

Auf den verschiedensten Gebieten des Bauwesens werden Gebäude oder einzelne Bauteile entworfen, bei denen es im Hinblick auf ihr Schwingungsverhalten auf besondere Dämpfungseigenschaften ankommt. Diese Dämpfungseigenschaften hängen je nach den verwendeten Werkstoffen von einer Vielzahl von Parametern ab. Da dynamisch wirkende Kräfte sehr viel größere Verformungen und Beanspruchungen in Bauwerksteilen hervorrufen können als dem Betrag nach gleich große statische Kräfte, ist bei der Auslegung und Bemessung von Bauwerken bzw. Bauwerksteilen für dynamische Lasten oftmals eine Schwingungsuntersuchung erforderlich. Ein wesentlicher Teil einer Schwingungsuntersuchung ist die Ermittlung der Eigenfrequenzen und Eigenformen des Bauwerkes bzw. der einzelnen Gebäudeteile. Bei der Ermittlung der Schnittkräfte und Verformungen infolge eines dynamischen Lastfalles ist neben der Ermittlung des Abstandes der Bauteileigenfrequenzen zu der Erregefrequenz die Bestimmung des Dämpfungsvermögens der verwendeten Werkstoffe einer der wichtigsten Einflußfaktoren.

Bei der Errichtung von Kernkraftwerken ist die Verwendung von Mauerwerkswänden an vielen Stellen aus betrieblichen und errichtungstechnischen Gründen erforderlich. Da diese Mauerwerkswände auch sicherheitstechnisch relevante Anlagenteile umschließen, müssen sie für die standortspezifischen Erdbebenbeanspruchungen ausgelegt sein, um keine Schäden an wesentlichen elektro- oder maschinentechnischen Komponenten zu verursachen. Die Mauerwerkswände haben im allgemeinen keine statische Funktion, sondern dienen nur der Raumumschließung und nuklearen Abschirmung.

Der Bestimmung des Dämpfungsvermögens von Mauerwerk kommt aber für die Auslegung und Berechnung entscheidende Bedeutung zu.

Die Behandlung von linearen Schwingern nimmt in der Literatur über Schwingungstechnik und -theorie und über modale Analysen einen breiten Raum ein. Die Eigensysteme berechnet man bei nicht zu großer Dämpfung am ungedämpften System also dämpfungsunabhängig. So wird z. B. in der Praxis bei der Berechnung transienter Schwingungen linearer Systeme mit Hilfe der modalen Analyse anstelle der matriziellen Systemgleichungen des gedämpften, diskreten Systems

$$M \cdot \ddot{q} + D \cdot \dot{q} + K \cdot q = B \cdot f(t)$$

von den Systemgleichungen des ungedämpften Systems

$$M \cdot \ddot{q} + K \cdot q = B \cdot f(t)$$

ausgegangen. Durch die Vernachlässigung des Terms  $D \cdot \dot{q}$  wird vermieden, daß zur Entwicklung der Belastungsfunktion  $B \cdot f(t)$  in modale Anteile ein komplexes Eigenwertproblem zu lösen ist. Die modalen Dämpfungen werden dann mit den Eigenformen des ungedämpften Systems auf Elementebene aus der anteilig dissipierten Energie berechnet.

Die physikalische Ursache einer Dämpfung sind Energieverluste. Man unterscheidet bei Dämpfungen daher nach der Art des Energieverlustes äußere und innere Dämpfungen.

Zur ersten Gruppe gehören zum Beispiel die Luftdämpfung oder der Energietransport über die Lager der Struktur in die Umgebung. Die zweite Gruppe resultiert aus der Energiedissipation im Werkstoff und aus der Hysterese in Fügstellen. Es ist bekannt, daß die Verbindungen im allgemeinen viel mehr zur inneren Dämpfung beitragen als das Material.

## 2. Literaturübersicht und Stand der Erkenntnisse

Die mathematische Beschreibung und die numerische Behandlung der Dämpfung ist notwendig. Zur Reduzierung des Rechenaufwandes nimmt man heute noch vielfach an, daß zwischen den Verformungen und den Beanspruchungen sowie deren zeitlichen Ableitungen eine lineare Beziehung besteht, in die nur die augenblicklichen Werte dieser Größen eingehen. Der erste Vorschlag dieser Art stammt wohl von O.E. Meyer /1/ aus dem Jahre 1874. L. Boltzmann /2/ stellte 1876 eine allgemeinere Theorie auf, die die elastische Nachwirkung von Werkstoffen erklärt. Er führte den Begriff der Nachwirkungsfunktion ein, die einen Zusammenhang zwischen den augenblicklichen Beanspruchungen und Verformungen und der gesamten Verformungsgeschichte herstellt. Diese Theorie setzt ein lineares Werkstoffgesetz und ein schwindendes Gedächtnis voraus.

C.A. de Coulomb /3/ berichtete zwar bereits 1784 über die Werkstoffdämpfung bei Torsionsschwingungen, ein stärkeres Interesse setzte aber erst zu Beginn dieses Jahrhunderts ein. Grundsätzliche Überlegungen und Experimente an Metallen haben S. Berliner /4/, E. Heyn /5/ und G. Masing und W. Mauksch /6/ beigesteuert. Sie zeigten, daß Metalle unter Umständen ein perfektes - also nicht schwindendes - Gedächtnis besitzen und nichtlineare Materialgesetze gelten. Zahlreiche Ergebnisse stammen ferner von A.L. Kimball und D.E. Lovell /7/, E. Becker und O. Föppl /8/ sowie von R.L. Wegel und H. Walther /9/ aus den Jahren 1927, 1928 und 1935. Inzwischen liegen mehrere tausend Veröffentlichungen zu diesem Thema vor. Einen auf Inge-

nieuraufgaben ausgerichteten Überblick gaben B.J. Lazan /10/ und W.B. Graham /11/. Im allgemeinen Fall gelten für Schwinger mit Material- und Werkstoffdämpfung nichtlineare Integro-Differentialgleichungen und es erscheint unmöglich, exakte Lösungen anzugeben. Bei relativ kleinen Energieverlusten kann man jedoch mit der Mittelungsmethode von Krylow-Bogoljebow-Mitropolski Näherungslösungen bestimmen.

Bei der Betrachtung der Dämpfung von Stahlkonstruktionen muß man grundsätzlich zwischen geschweißten und geschraubten oder genieteten Stahlkonstruktionen unterscheiden. Bei den geschweißten Stahlkonstruktionen ist der Anteil der Werkstoffdämpfung gegenüber der Strukturdämpfung überproportional groß.

Noch stärker als bei der Werkstoffdämpfung ist die Nichtlinearität bei der Hysterese von Fügeverbindungen ausgeprägt, wo sie fast den Regelfall darstellt. Die Energieverluste entstehen meistens durch Coulomb'sche Reibung an den Kontaktflächen der aneinandergefügten Teile. Diese verformen sich bei mechanischer Beanspruchung unterschiedlich und verschieben sich relativ zueinander. L.E. Goodman und C.B. Brown /12/ berichten über analytische Berechnungen an einfach aufgebauten Fügeverbindungen. Trotz stark vereinfachender Annahmen besteht eine qualitative Übereinstimmung mit Experimenten.

In neuerer Zeit wurde eine Fülle von Arbeiten veröffentlicht, die die Energiedissipation in Schwingungssystemen durch Hysterese in Fügeverbindungen und die Möglichkeiten zur Erhöhung der Strukturdämpfung be-



treffen. Viele Autoren schlossen vom dynamischen Verhalten eines Systems auf die mechanischen Eigenschaften einer darin enthaltenen Fügeverbindung. Das bedeutet jedoch einen Umweg, der Unsicherheiten und Fehlermöglichkeiten mit sich bringt. Für bestimmte Fügeverbindungen spielt die Energiedissipation durch Coulomb'sche Reibung offenkundig nur eine untergeordnete Rolle. Bei schwingender Biegeverformung von Platten mit aufgeschraubten oder aufgenieteten Versteifungen, wie man sie im Flugzeugbau antrifft, klaffen die Fugen auf und schließen sich wieder. Dadurch wird Luft angesaugt und herausgequetscht. Vor allem bei hohen Erregungsfrequenzen liefert dieses von G. Maidanik in /13/ genannte "gas pumping" den wesentlichen Anteil zur Strukturdämpfung. Experimentelle Ergebnisse sowie Untersuchungen mit Hilfe statistischer Methoden wurden von E.E. Ungar /14/ sowie E.E. Ungar und J.R. Carbo-nell /15/ veröffentlicht. In diesem Fall beschreiben lineare Differentialgleichungen das mechanische Verhalten des Systems. D. Ottl /16/ behandelt, ausgehend von Experimenten, die sich größtenteils auf harmonische Belastung oder Verformung beschränken, diskrete mechanische Schwinger mit Gedächtnis und linearer sowie nichtlinearer Dämpfung und vergleicht deren dynamisches Verhalten mit dem von linearen Systemen ohne Gedächtnis.

Über das Schwingungsverhalten und zur Dämpfung von Stahlbeton- und Spannbetonkonstruktionen liegen heute eine Fülle von Veröffentlichungen vor. Da Beton und Mauerwerk prinzipiell im Hinblick auf das Dämpfungsverhalten ähnlich sind, wird im folgenden das Dämpfungsverhalten von Betonkonstruktionen behandelt. Eine Zusammenfassung dieser Arbeiten hat K.-T. Teichen /17/ veröffentlicht.

Die Anwendung dynamischer Prüfverfahren zur Ermittlung elastisch-plastischer Größen von Beton begann erst in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts (S. Ban /18/, T.C. Powers /19/). Nach J. Ali und C.E. Kesler /20/ war es W.T. Thomson /21/, der als erster die Dämpfungseigenschaften von Beton studierte.

In den letzten zwanzig Jahren haben die dynamischen Prüfmethoden für Beton laufend an Bedeutung gewonnen, doch galt das Interesse fast ausschließlich der zerstörungsfreien Bestimmung des Elastizitätsmoduls und der Betonfestigkeit. J. Ali und C.E. Kesler /20/ führten folgende Gründe für die geringe Beachtung der Betondämpfung an: experimentelle Probleme, Verkennung des Informationswertes der Dämpfungsgröße für die Materialprüfung und Unkenntnis über die Verwendung in der Ingenieurpraxis.

E. Bock /22/ führte 1939 an ungerissenen Betonbalken und verschieden stark bewehrten Stahlbetonbalken bei verschieden starken Amplituden Untersuchungen mit Biege- und Längsschwingungen durch. Über Stahlbetonbalken mit Biegerissen wird lediglich allgemein ausgesagt, daß die absolute Größe der Eigenfrequenz von der Rißtiefe und von der Schwingungsamplitude abhängig ist, vermutlich nicht wegen unterschiedlicher Dämpfung, sondern wegen unterschiedlicher Biegesteifigkeiten.

1952 beschrieben G. Denkhaus und G. Dück /23/ Untersuchungen an zentrisch vorgespannten Betonbalken ohne Verbund bei Biegeschwingungen, wobei die Spannkraft variiert und die Betonspannungen aus der Vorspannkraft bis zu  $0,76 \text{ kN/cm}^2$  gesteigert wurden. Die Versuche

wurden offenbar an Balken aus schlechtem beziehungsweise gerissenem Beton ausgeführt, da die errechneten Elastizitätsmoduli nur etwa  $12000 \text{ kN/cm}^2$  betrugen und damit weit unter der Norm von Spannbeton liegen.

1958 führte G.O. Fritz-de la Orta /24/ weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet unter besonderer Berücksichtigung der durch Erdbeben entstehenden Kräfte durch.

H. Lenk /25/ hat zur Ermittlung des Einflusses des Vorspanngrades und der Größe der äußeren Lasten auf die Schwingungskennwerte E-Modul und Dämpfungsmaß von Betonbalken mit zentrischer Vorspannung und nachträglichem Verbund mit vier verschiedenen Vorspanngraden hergestellt. Um eine große Vorspannkraft zu ermöglichen und damit einen eventuellen Einfluß auf die Meßwerte deutlicher sichtbar zu machen, wurde eine hohe Betongüte gewählt. Von fünf Balkentypen wurden zum Ausgleich der Streuung je drei Stück untersucht.

R. Jones und E.N. Gatfield /26/ machten Versuche an Betonbalken, die sie auf elektrodynamische Weise zu Resonanzschwingungen anregten, wobei in Balkenmitte Randdehnungen von rund 0,1 % entstanden. Einige Balken konnten auf diese Weise bis zum Ermüdungsbruch beansprucht werden. Dieser kündigte sich durch eine Erhöhung der inneren Dämpfung an. Ziel der Untersuchung war es, die vielfach beobachteten Unterschiede zwischen "dynamischem" und "statischem" E-Modul zu erklären. Es zeigte sich, daß die Spannungs-Dehnungs-Kurve unter wechselnder Last ähnlich der im quasi-statischen Versuch verläuft. Es treten offenbar schon bei

kleineren Dehnungen Strukturveränderungen im Beton auf, die den E-Modul verkleinern. Der sogenannte dynamische E-Modul wird aber bei vernachlässigbar kleinen Dehnungen und hohen Dehngeschwindigkeiten bestimmt. K. Gaede /27/ untersuchte die Festigkeit und die Verformung von Betonprismen bei Druck-Schwell-Beanspruchung. Aus seinen Ergebnissen für die geringe Lastspielzahlen (zwischen 1 und 20) werden die Werte des Verlustfaktors bestimmt. Eine klare Tendenz ist nicht immer zu erkennen. In einem Beispiel ergibt sich die Dämpfung beim ersten Lastwechsel deutlich höher als in einem anderen Falle, bei dem der Wasserzementwert und die bezogene Schwingweite größer sind, die Festigkeit aber nur halb so hoch liegt. Ein Beispiel mit der umgekehrten Tendenz, die man erwarten würde, führt er dagegen auch an. A. Mehmel und E. Kern /28/ führten ähnliche Untersuchungen wie K. Gaede /27/ durch. Sie benutzten die beiden Betongüten B25 und B50, wobei jeweils eine Gruppe mit hohem Zementgehalt und eine mit niedrigem Zementgehalt bei passender Wahl der Zuschlagstoffe hergestellt wurde. Häufig wird dem Zementstein im Beton die Rolle der viskosen Stoffphase zugeschrieben, den Zuschlagstoffen die der elastischen. Diese Vorstellung wurde hinsichtlich der Dämpfung nicht durchweg bestätigt. Vielmehr ist der ermittelte Verlustfaktor bei sonst gleichen Verhältnissen trotz des verschiedenen Zementgehaltes fast gleich, teilweise gilt sogar die Zuordnung geringerer Zementgehalt/höhere Dämpfung. Dagegen ist ein auffälliger Unterschied im Verlustfaktor zwischen den Betonsorten mit höherem und niedrigerem Wasserzementwert (bzw. niedriger und höherer Festigkeit) festzustellen. Doch wird auch diese Tendenz von einem vergleichbaren Fall wieder durchbrochen. K.-T. Teichen /17/ hat durch sei-

ne Experimente gezeigt, daß die Dämpfungswerte für Spannungen im Gebrauchslastbereich wesentlich höher liegen als bei Resonanzmessungen mit verschwindend kleiner Lastamplitude und für eine nicht zu hohe bezogene Schwingweite mit steigender Lastwechselzahl abnehmen: bei 2 Millionen Lastwechseln im Mittel um 16 % (5,3 Hz) und um 25 % (15,9 Hz). Aus seinen Messungen ist eine Abhängigkeit der Dämpfung vom Wassergehalt abzulesen, und zwar steigt die Dämpfung mit dem Wassergehalt. Der Wasserzementwert allein ist kein Maßstab; es geht vielmehr darum, wieweit die offenen Poren wassergefüllt sind. Bei gleichem Wasser-Zement-Faktor wurde der Verlustfaktor der nassen Proben maximal etwa 2,5mal größer als der der trockenen Proben. Seine Versuche zeigen eine Frequenzabhängigkeit der Dämpfung oberhalb 2,5 Hz. Er konnte allerdings nur den Bereich bis 16 Hz untersuchen. Das Maximum der Dämpfung lag bei etwa 11 Hz.

Bei den Versuchen von R. Dieterle und H. Bachmann /29/ mit Stahlbeton- und Leichtbetonbalken wurde gezeigt, daß nach eingetretener Rißbildung ein Zustand erreicht wird, bei dem die Dämpfung nicht mehr weiter ansteigt, sondern sogar bei einer weiteren Vergrößerung der Amplitude und zunehmender Lastzyklenzahl abnimmt.

A. Ötes hat in /30/ zur Untersuchung des nichtlinearen Werkstoffverhaltens von Stahlbetontragwerken unter Erdbebenbeanspruchung Erdbebensimulationsversuche an großmaßstäblichen Stahlbetonzementtragwerken durchgeführt. Die Auswertung der aufgezeichneten Kraft-Ver-schiebungs-Zyklen ergibt einen Einblick in den Energiehaushalt der verschiedenen dynamischen Systeme.

E. Fehling und G. König haben in /31/ die Energiedissipation von Stahlbeton infolge Verbundhysterese untersucht. Dabei haben sie im besonderen das Verhalten des Werkstoffes zwischen zwei Rissen betrachtet. Die Versuchsergebnisse zeigen den großen Einfluß der Belastung und Vorbelastung sowie der Parameter, die den Rißabstand beeinflussen, auf Steifigkeit und Dämpfungsverhalten der Konstruktion.

Über das Verhalten von bewehrten Mauerwerkswänden unter dynamischer Belastung und den dazu durchgeführten Versuchen liegen eine Vielzahl von Veröffentlichungen, hauptsächlich aus dem angelsächsischen Sprachraum, vor. Alle diese Veröffentlichungen sind in den beiden grundsätzlichen Arbeiten von R.L. Mayes und R.W. Clough "A Literature Survey-Compressive, Tensile, Bond and Shear Strength of Masonry" /32/ und "State-of-the-Art in Seismic Shear Strength of Masonry" /33/ zusammengefaßt und bewertet. Die Versuchsergebnisse aus diesen Arbeiten über bewehrte Mauerwerkswände kann man folgendermaßen zusammenfassen:

- Bei Mauerwerkswänden gibt es infolge dynamischer Belastung in Wandebene zwei Hauptversagensarten: den Schub- oder Diagonalzugbruch, der durch diagonale Rißbildung gekennzeichnet ist, oder den Biege- oder Sekundärzugbruch, der durch das Versagen der Zugbewegung und des Versagens der Druckzonen an der Wandbasis gekennzeichnet ist. Eine dritte, aber sehr unwahrscheinliche Versagensart ist der reine Druckbruch.

- Aus den durchgeführten Versuchen lassen sich einfache und ziemlich genaue Methoden für die Berechnung der Grenzbiegetragfähigkeit in der Wandebene herleiten.
- Aus den Versuchsergebnissen ergeben sich nur grobe Abschätzungen für die Grenzs Schubtragfähigkeit, die zudem nur in eigenen Grenzen gültig sind.
- Durch das Verputzen einer Wand wird die Grenzs Schubtragfähigkeit erhöht.
- Eine Erhöhung der Auflast bedingt ein duktileres Verhalten der Mauerwerkswand bei Schubbrüchen.
- Unter gleichbleibender Belastung wird die theoretische Grenzbiegetragfähigkeit in Wandebene aufgrund der Kaltverfestigung der Zugbewehrung um durchschnittlich 14 % überschritten.
- Zur Verbesserung der Grenzs Schubtragfähigkeit eignet sich Schubbewehrung unter der Voraussetzung, daß diese Bewehrung so dimensioniert wird, daß damit auch die Grenzbiegetragfähigkeit in Wandebene abgedeckt wird.
- Horizontal verlegte Bewehrung ist im Hinblick auf das Verhindern von Diagonalrissen ungefähr dreimal wirksamer als vertikal verlegte Bewehrung.
- Eine deutliche Traglasterhöhung wird dadurch erreicht, daß die unteren, am stärksten bruchgefährdeten Mörtelschichten an den Schmalseiten der

Versuchskörper mit Stahlplatten verstärkt werden. Diese Plattenanordnung begrenzt die Bruchzone und vermindert die vertikale Rißbildung.

- Mauerwerkswände aus Vollsteinen haben eine etwas höhere Grenztragfähigkeit als Wände aus Hohlsteinen, weil die Verbundfläche zwischen Mörtel und Stein größer ist.

Diese Untersuchungen und Versuche wurden alle im Hinblick auf die Erdbebensicherheit von bewehrten Mauerwerksbauwerken und im besonderen die Erdbebensicherheit von mit Mauerwerkswänden ausgesteiften Stahl- oder Stahlbetonskelettbauwerken durchgeführt. Das heißt, es wurden ausschließlich dynamische Belastungen in der Wandebene wirkend untersucht und getestet. K. Kaplan, B.L. Gabrielsen und W.H. Van Horn haben in /34/ für verschiedene Lagerungsarten das Versagen von bewehrten Mauerwerkswänden (Plattenversagen) infolge des Lastfalles "Explosionsdruckwelle" dargestellt. Dabei wird jedoch nur auf die mechanischen Versagungsmodelle und auf die Grenztragfähigkeit der Mauerwerkswände eingegangen.

Zum Schwingungsverhalten und im besonderen zum Dämpfungsverhalten von Mauerwerkswänden infolge dynamischer Belastung senkrecht zur Wandebene liegt keine Literatur zu Untersuchungen und Versuchsergebnissen vor.

### 3. Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Lücke in der Erforschung des dynamischen Verhaltens von Mauerwerkskonstruktionen zu schließen und Dämpfungsfaktoren für Mauerwerkswände unter dynamischer Belastung senkrecht zur Wandebene zu bestimmen.

Um die Ergebnisse zum Dämpfungsvermögen von Mauerwerkswänden abzusichern, im besonderen um einen eventuellen Einfluß aus dem Versuchsaufbau zu erkennen und quantifizieren zu können, wird das Dämpfungsvermögen einer Stahlbetonwand bei gleichem Versuchsaufbau bestimmt. Die Ergebnisse werden mit den in der Literatur angegebenen Werten verglichen und gewertet.

Die Einflüsse aus den elektrischen Meß- und Regelkreisen auf die Meßergebnisse zum Dämpfungsvermögen werden durch Versuche mit dem speziell dafür entwickelten "Triplexstab" erfaßt. Gleichzeitig können mit diesem "Triplexstab" Abschätzungen zum Einfluß des Versuchsaufbaues und der Versuchsdurchführung erkannt werden.

Das Dämpfungsvermögen von Mauerwerkskonstruktionen ist von der Konstruktion des Tragwerkes, von Größe und Art der Belastung und vom Baustoff selbst abhängig. Die vom Baustoff abhängigen Einflußfaktoren auf das Dämpfungsvermögen können nur durch Versuche im Laboratorium oder am fertigen Bauwerk bestimmt werden, wohingegen die anderen Einflußfaktoren bereits von vornherein vorgegeben sind.

Ein wichtiger Aspekt der Baustoffeigenschaften ist die Verminderung der Festigkeit nach einer sehr großen Anzahl von Lastwechseln, die sogenannte Materialermüdung. Diese Materialermüdung, oder - positiv ausgedrückt - Dauerschwingfestigkeit, wird in dieser Arbeit nicht behandelt.

#### 4. Lösungsansatz - Experiment

##### 4.1 Begriffsbestimmung und Vorgehensweise

Dämpfung ist das beobachtbare Abklingen einer freien Schwingung. Ursache dafür ist die Energiedissipation, d.h. zum Beispiel bei einem mechanischen Schwinger die nicht umkehrbare Umwandlung potentieller und kinetischer Energie in andere Energieformen, vornehmlich in Wärme /20/. Die Dämpfung entspricht der mechanischen Energie, die einem schwingenden System /17/ entzogen wird. Die Dissipation von Energie bedingt, daß bei der freien Schwingung die Schwingungsamplituden reduziert werden und die Bewegung zum Erliegen kommt, wenn die ganze ursprünglich gespeicherte Energie dissipiert ist. Aus gemessenen Dämpfungswerten läßt sich der Charakter der Energiedissipation oft nicht erkennen. Dies hat seine Ursache darin, daß die unmittelbare Folge der diesbezüglichen inneren Vorgänge im Material, nämlich der Verlust an Schwingungsenergie, nur als pauschale, makroskopische Erscheinung auftritt.

In der umfangreichen Literatur über Dämpfungsuntersuchungen, vor allem an Metallen, werden zahlreiche Begriffe und Definitionen zur Beschreibung der Dämpfung verwendet, von denen hier einige ohne Anspruch auf Vollständigkeit erwähnt werden sollen:

Dämpfungsfaktor

Abklingkonstante

Dämpfungsmodul

Dämpfungskonstante

Koeffizient der inneren Reibung

Dämpfungsziffer

spezifische Dämpfung  
Dissipationenergie  
Viskosität  
prozentuale Dämpfung  
Kehrwert der Güte.

In allen Fällen geht es um ein Maß für den Energiebetrag, der einem schwingenden System durch "Dämpfung" entzogen wird. Es geht dabei sowohl um Energieverluste infolge Luftreibung, Schallentwicklung oder sonstiger Abstrahlung an den Grenzen zweier Medien als auch um innere Dämpfung eines Materials.

In dieser Arbeit werden modale Systeme zugrunde gelegt und es wird der Einfluß der inneren Bauteildämpfung von Mauerwerk behandelt. Die gesamten experimentellen Ergebnisse und weiteren Betrachtungen werden anhand eines geschwindigkeitsproportionalen Ansatzes (viskose Dämpfung) gemacht.

Die verwendeten grundlegenden Beziehungen der Maßzahlen lassen sich an einem Schwinger mit einem Freiheitsgrad ableiten.

Im folgenden werden die mathematischen Methoden beschrieben, mit denen bei dem gewählten Versuchsaufbau die Maßzahlen der Dämpfung von Mauerwerk bestimmt werden.

#### 4.1.1 Das logarithmische Dekrement

Bei einer frei abklingenden Schwingung ist das logarithmische Dekrement eine maßgebende Kenngröße für das Dämpfungsverhalten. Es ist nach DIN 1311, Bl. 1 und Bl. 2 /35/ definiert als der natürliche Logarithmus des Quotienten aus zwei am Abstand von  $n$  Perioden aufeinanderfolgenden Maximalausschlägen gleichen Vorzeichens (Abbildung 1).

Beim linearen Schwinger ist

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{a_2}{a_3} = \frac{a_3}{a_4} = e^{\Lambda} = \text{konstant} \quad [1]$$

mit  $a$  = Amplitude.

Ein linearer Schwinger liegt vor, wenn seine charakteristischen Größen Federkonstante, Dämpfungskoeffizient und seine Masse konstant sind.

Im allgemeinen kann auch bei Werkstoffen und Baustoffen vorausgesetzt werden, daß ihre Eigenschaften während eines Schwingungsvorganges konstant bleiben.

Handelt es sich um eine nur schwach gedämpfte Schwingung, so ist es zweckmäßig, den Quotienten aus zwei im Abstand von  $n$  Perioden aufeinander folgenden Maximalwerten zu bilden. Allgemein gilt daher für das logarithmische Dekrement:

$$\Lambda = \frac{1}{n} \cdot \ln \cdot \frac{a_n}{a_n + 1} \quad [2]$$

Zwischen dem logarithmischen Dekrement und der relativen Dämpfung  $D$  besteht der Zusammenhang

$$\Lambda = 2\pi \frac{D}{\sqrt{1 - D^2}} \quad [3]$$

Wie daraus zu erkennen ist, wird für kleine Werte von D

$$\Lambda = 2\pi D \quad [4]$$

Wenn Gleichung [4] nach D aufgelöst wird, ergibt sich

$$D = \frac{\Lambda}{2\pi} \quad [5]$$

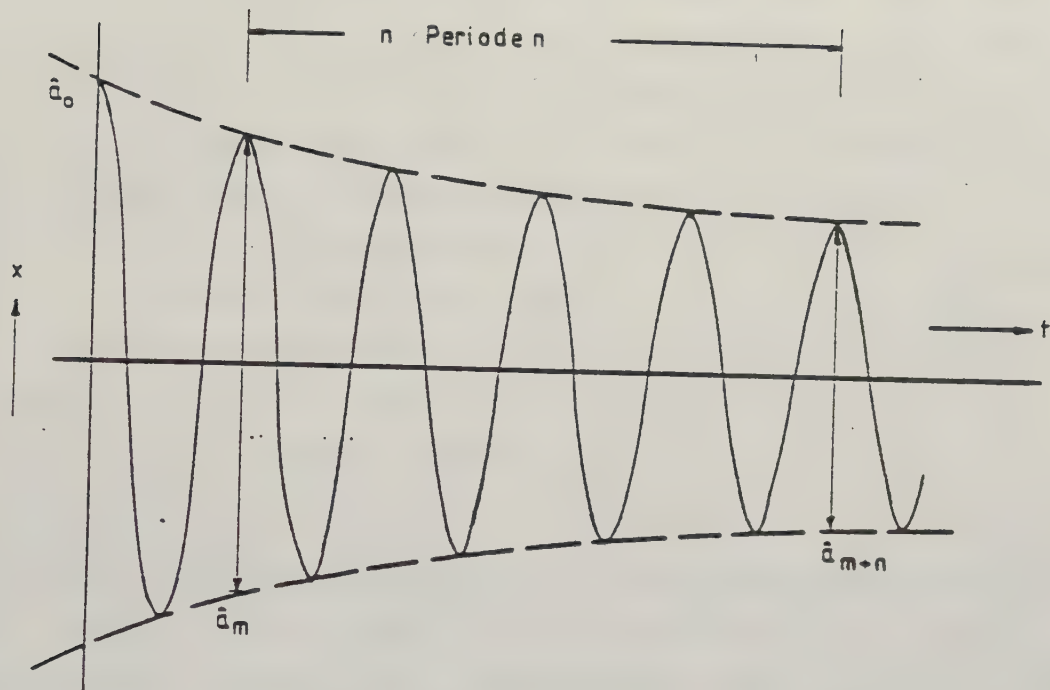
Der Vorteil des beschriebenen Verfahrens liegt in der einfachen Anwendung. Benötigt wird lediglich ein Schwingaufnehmer und ein Registriergerät. Das Schwingungssystem wird z.B. durch ein Stoßsignal oder eine kurzzeitig erfolgte periodische Anregung in seiner Eigenfrequenz angeregt und der Ausschwingvorgang bis zur Ruhelage als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Die Anwendbarkeit des Verfahrens setzt voraus, daß die Hüllkurve der abklingenden Schwingung nach einer Exponentialfunktion verläuft. Diese Bedingung ist dann erfüllt, wenn eine der Schwinggeschwindigkeit proportionale Dämpfung vorliegt. Bei der praktischen Anwendung kann fast immer von dieser Voraussetzung ausgegangen werden.

Für den Fall, daß die Dämpfung aus einer dem Coulomb'schen Reibungsgesetz folgenden konstanten Reibungskraft  $F_r$  resultiert, ergibt sich nach [17] beispielsweise mit den Schwingungsamplituden  $a_0$  als logarithmisches Dekrement

$$\Lambda = \frac{4 F_r}{\pi \cdot \omega_0^2 \cdot a_0} \quad [6]$$

Da während des Ausschwingvorganges auch die Kennfrequenz  $\omega_0$  praktisch eine Konstante ist, kann festgestellt werden, daß die Dämpfung mit kleiner werdender Amplitude  $a_0$  ansteigen wird.

Mit Hilfe der Ausschwingkurve kann unter der Voraussetzung einer geschwindigkeitsproportionalen Dämpfungskraft das logarithmische Dekrement  $\Lambda$  auch aus  $n$  Schwingungen ermittelt werden (Abbildung 1). Andernfalls, wenn also z.B. die Dämpfung von der Größe der Amplitude  $a(t)$  abhängt, bleibt  $\Lambda$  über viele Perioden nicht konstant. Dieser Fall kann bei unvollkommenen elastischen Stoffen vorkommen (Nichtlinearität). Dann entfällt der Vorteil der Methode der abklingenden Schwingung, nämlich daß man trotz kleiner Dämpfung genaue Werte durch Messung über viele Schwingungszyklen bekommt.



$$\Lambda = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{\hat{a}_m}{\hat{a}_{m+n}} \right)$$

Abbildung 1 Abklingende Schwingung

Zur Kontrolle, ob die Dämpfung amplitudenabhängig ist, trägt man die Amplituden in halblogarithmischem Maßstab über der Zahl der Perioden auf. Der Anstieg der Kurve ist gleich  $\lambda$ . Handelt es sich um eine Gerade, so ist  $\lambda$  konstant und von  $a(t)$  unabhängig, Abbildung 2. Andernfalls ergibt sich eine gekrümmte Linie. Wenn möglich, sollte man dann die Anfangsamplitude  $\hat{a}_0$  in verschiedenen Versuchen variieren und die Dämpfung in den einzelnen Intervallen von  $\hat{a}$  bestimmen.

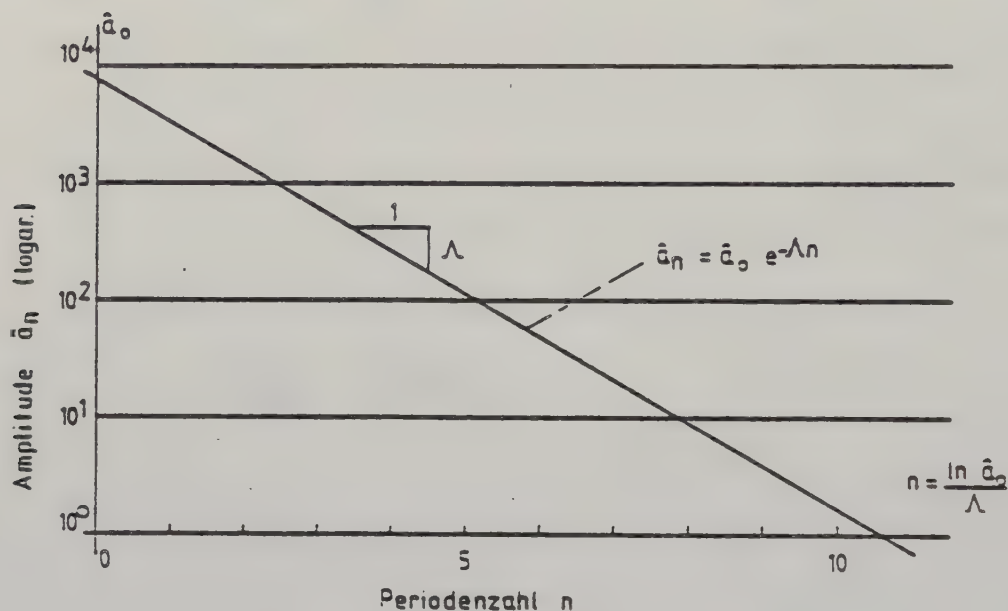


Abbildung 2 Kontrolle der Amplitudenabhängigkeit von  $\lambda$

Eine Schwierigkeit, die gerade bei kleinen Dämpfungswerten auftritt, ist in den Energieverlusten außerhalb des untersuchten Stoffes zu sehen. Der Probekörper sollte immer in seinen Schwingungsknoten gelagert werden.

Da die freie Schwingung nur in der jeweiligen Eigenfrequenz auftreten kann, wobei zu sagen ist, daß die Anregung von Oberschwingungen oft schwierig ist, muß eine Variation der Frequenz, etwa um die Frequenzabhängigkeit der Dämpfung zu überprüfen, z. B. durch Änderung der Schwingergeometrie bewirkt werden oder man variiert die Größe des Trägheitsmomentes (Federsteifigkeit) einer fest angekoppelten Masse.

#### 4.1.2 Die Resonanzkurve bzw. Bandbreitenmethode

Zur Bestimmung der Dämpfung aus der Resonanzkurve läßt man bei konstanter Erregeramplitude die Erregerfrequenz  $\omega$  alle Werte von 0 bis über  $\omega_0$  hinaus durchlaufen. Dadurch nimmt die erzeugte Schwingungsgröße bis zum Resonanzmaximum zu und fällt anschließend auf Null ab, Abbildung 3.

Bei diesem Versuch ist Voraussetzung, daß sich der Schwinger bei der Messung der Wegamplitude in "eingeschwungenem" Zustand befindet. Das heißt, die Erregerfrequenz muß langsam verändert und während der Messung von  $\hat{a}$  konstant gehalten werden. Nur dann ist die zugehörige Wegamplitude konstant.

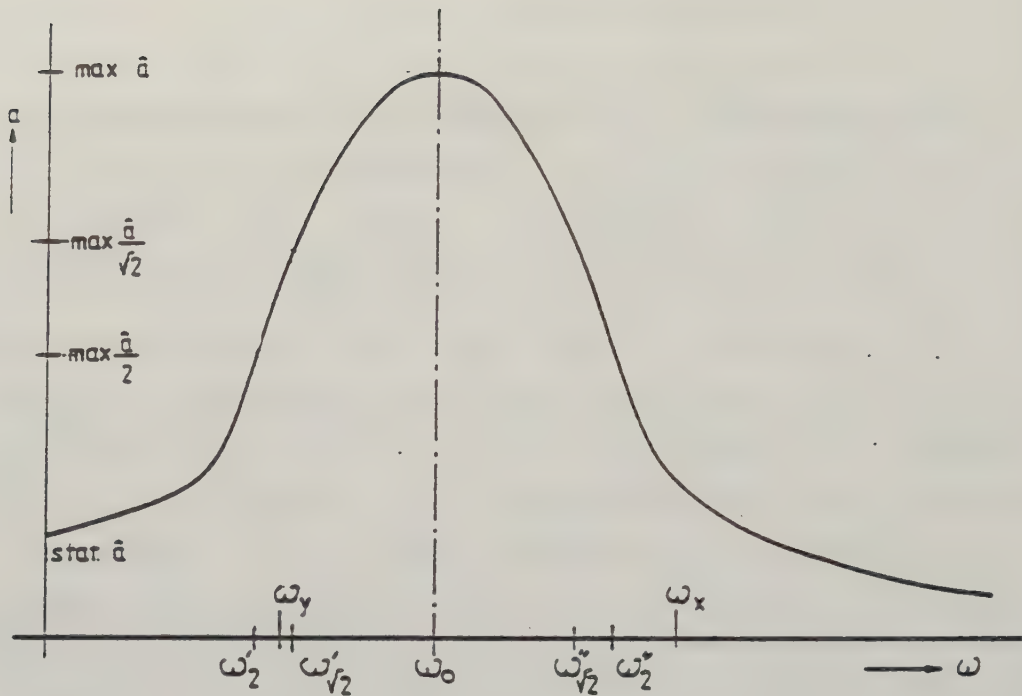


Abbildung 3 Resonanzkurve des Schwingungsweges  
mit  $\hat{a}$  = Amplitude und  $\omega$  = Frequenz

Aus der Kurve  $\hat{a} = f(\omega)$  können verschiedene Informationen über die innere Dämpfung entnommen werden, Abbildung 3. Zunächst ist die Bestimmung von  $\omega_0$  und  $\text{max. } \hat{a}$  erforderlich. Der Verlustfaktor  $d$  kann zu

$$d = \hat{a}_{\text{statisch}} / \text{max. } \hat{a} \quad [7]$$

bestimmt werden. Ferner kann die Messung des Verlustwinkels bei  $\omega_x$  und  $\omega_y$  durchgeführt werden, die die Kenntnis von  $\omega_0$  voraussetzt. Als eigentliche Auswertung der Resonanzkurve hinsichtlich der Dämpfung gilt aber die Bestimmung der sogenannten Bandbreite, d.h. der Frequenzunterschiede zwischen den Punkten,

bei denen die Wegamplitude einen gewissen Bruchteil von max.  $\hat{a}$  erreicht. Allgemein gilt für den Verlustfaktor die Beziehung

$$d_n = \frac{\omega_n'' - \omega_n'}{\omega_0 \sqrt{n^2 - 1}} \quad [8]$$

wenn  $d_n$  der Divisor von max.  $\hat{a}$  ist. In Abbildung 3 sind die beiden häufigsten Fälle dargestellt.

wenn  $n = \sqrt{2}$ , dann ist  $d_{\sqrt{2}} = \frac{\omega_{\sqrt{2}}'' - \omega_{\sqrt{2}}'}{\omega_0}$

[9]

und wenn  $n = 2$ , dann ist  $d_2 = \frac{\omega_2'' - \omega_2'}{\omega_0 \cdot \sqrt{3}}$

[10]

Der Ausdruck

$$\Delta f = \frac{\omega_{\sqrt{2}}'' - \omega_{\sqrt{2}}'}{2\pi} \quad [11]$$

heißt auch Halbwertsbreite.

Die Resonanzkurve in Abbildung 3 wurde der Deutlichkeit halber sehr breit gezeichnet; sie beschreibt also einen Fall mit großer Dämpfung.

#### 4.1.3 Die Erregerkraft bei Resonanz

Bei der Verwendung der Formelzeichen in Anlehnung an die Bezeichnung in /33/ ergeben sich die folgenden Ableitungen für die Berechnung der Dämpfung "D" aus der gemessenen Erregerkraft bei Resonanz.

Die Bewegungsgleichung ergibt sich zu

$$M \cdot \ddot{q} + D \cdot \dot{q} + K \cdot q = F_0 \cdot \cos \omega t \quad [12]$$

mit  $F_0$  = Erregerkraft.

Die mechanische Impedanz  $z$  eines Systems ist als Quotient aus Kraft und Geschwindigkeit definiert:

$$z = \frac{F_0}{\dot{x}_0} \quad [13]$$

Für den Resonanzzustand wird

$$\omega = \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{a}} \quad [14]$$

und damit die mechanische Impedanz  $z$  gleich dem Dämpfungskoeffizienten  $b$ . Damit ergibt sich aus der Beziehung

$$b = \sigma \cdot 2a \text{ und } b = z = \frac{F_0}{\dot{x}_0} \quad [15]$$

durch Gleichsetzen der Dämpfungsgrad (Dämpfung)

$$\mathcal{D} = D \quad [16]$$
$$D = \frac{F_0}{2a \cdot \omega_0 \cdot x_0} = \frac{F_0}{2a \cdot \dot{x}_0}$$

## 4.2 Versuchsaufbau

Die Messung der Ausschwingkurve und die Bestimmung der Dämpfung aus der Resonanzkurve sind reproduzierbare Versuche, die auch dem besonderen Charakter des Werkstoffes Mauerwerk gerecht werden.

### 4.2.1 Versuchsstand

Der Schwingungsversuchsstand ist in einer Versuchshalle aufgebaut. Abbildung 5 gibt einen Überblick über die Anordnung des Schwingungsversuchsstandes in der Versuchshalle.

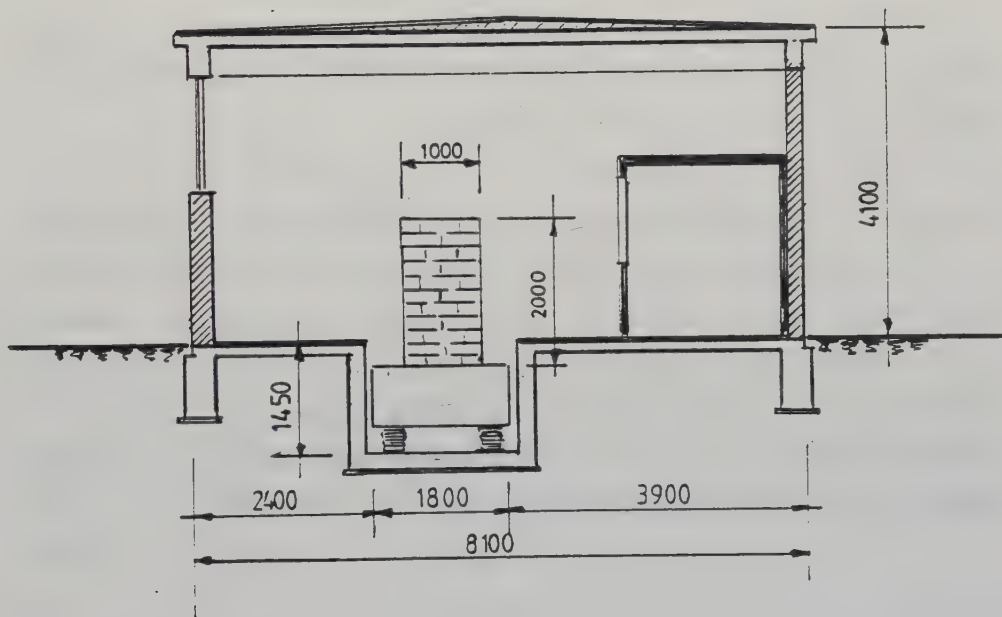


Abbildung 5 Versuchshalle, Querschnitt

Der Kern des Versuchsstandes besteht aus einem Stahlbetonfundament, auf dem der Prüfkörper und der elektrodynamische Erreger aufgebaut werden. Das Stahlbetonfundament hat die Abmessungen  $l/b/h = 3000/1800/800$  mm. Mit dem spezifischen Gewicht für Stahlbeton von  $\gamma = 2400 \text{ kg/m}^3$  ergibt sich damit eine Masse von ungefähr 10400 kg.

Der Schwingungserreger DERRITRON VP 600 M ist auf diesem Stahlbetonfundament fest verankert. Der Schwingungserreger hat eine Masse von 4500 kg. Damit ergibt sich eine Gesamtmasse von ungefähr 14900 kg, die mit Luftfedern von der Umgebung isoliert gelagert wird.

Der Fundamentblock mit dem darauf montierten Schwingungserreger ist auf sechs Effbe-Barry-Luftfederelementen Typ A2 133-6 gelagert.

Durch die Verwendung des Luftfedersystems anstelle von Federisolatoren, deren Federkörper aus Kautschuk, Federstahl oder anderem elastischen Material bestehen, wird eine tieffrequente Abstimmung ermöglicht. Das in Abbildung 6 dargestellte Luftfederelement besteht im wesentlichen aus zwei Teilen, und zwar der Druckkammer und der Dämpfungskammer.

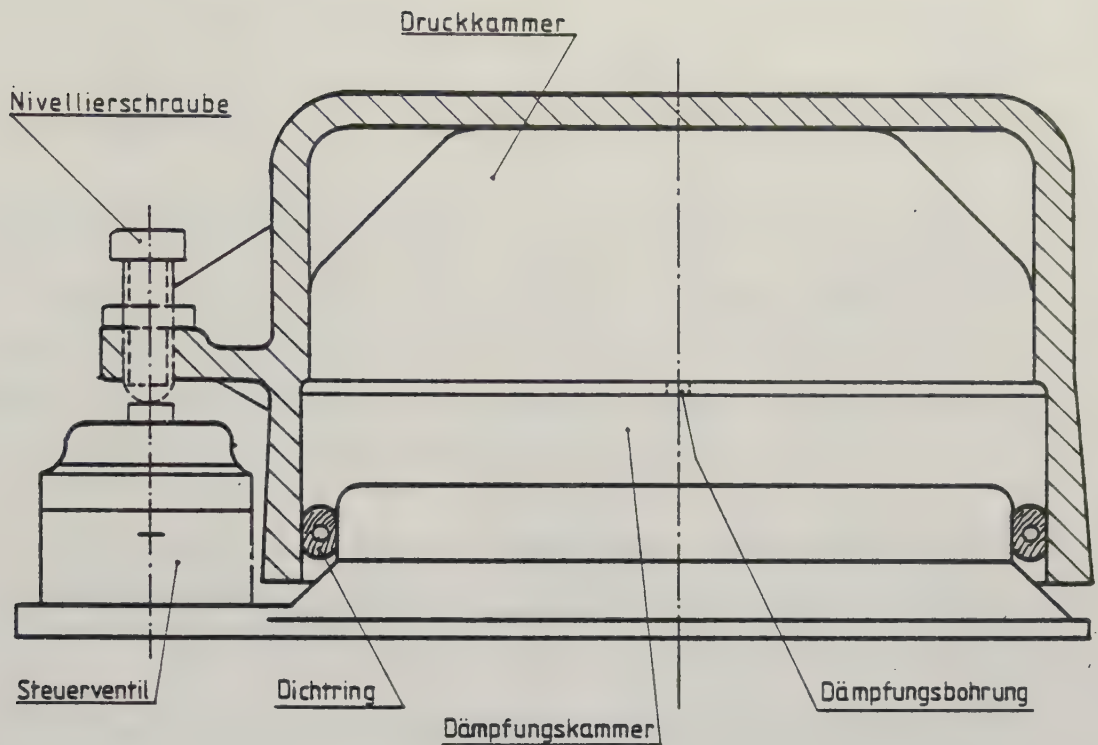


Abbildung 6 Luftfederelement Typ A2 133-6

Die beiden Kammern sind durch eine variable Bohrung miteinander verbunden, mit der die Steuerung der Eigenfrequenz der Resonanzüberhöhung möglich ist.

Die Eigenfrequenz in vertikaler Richtung ist  $f = 2,5 \text{ Hz}$ , die Dämpfung  $D = 96,7 \%$  der kritischen Dämpfung. Die Federsteifigkeiten der Einzelelemente haben bei dem Betriebsdruck von 4 atü die folgenden Werte:

$$C_{\text{vertikal}} = 590 \text{ kp/cm}$$

$$C_{\text{horizontal}} = 550 \text{ kp/cm.}$$

#### 4.2.2 Elektrische Einrichtung

Das elektrische Prüfsystem besteht aus einem elektrodynamischen Schwingerreger, der über einen geschlossenen Meß- und Regelkreis mit integrierter Leistungsstufe betrieben wird. Der elektrodynamische Schwingungserreger erzeugt die Erdbebenbeanspruchung der Mauerwerkswände beziehungsweise der Prüfkörper.

Das Blockschema Abbildung 7 zeigt einen Überblick über die Verknüpfung der einzelnen Geräte der Versuchsanordnung.

Im folgenden sind die verwendeten Geräte aufgelistet:

|                                           |              |                    |
|-------------------------------------------|--------------|--------------------|
| 1 Vibrator                                | Typ VP 600M  | (Derritron)        |
| 1 Leistungsverstärker                     | Typ 12000 WT | (Derritron)        |
| 1 Steuergenerator                         | Typ 1047     | (Brüel & Kjaer)    |
| 3 Kraftmeßelemente                        | Typ 9331     | (Kistler)          |
| 1 Beschleunigungsaufnehmer                | Typ 4370     | (Brüel & Kjaer)    |
| 2 Beschleunigungsaufnehmer                | Typ 7704-100 | (Endevco)          |
| 3 Ladungsverstärker                       | Typ 2635     | (Brüel & Kjaer)    |
| 3 elektron. Voltmeter                     | Typ 2425     | (Brüel & Kjaer)    |
| 3 Koordinatenschreiber                    | Typ 2308     | (Brüel & Kjaer)    |
| 1 Dehnindikator                           | Typ 1526     | (Brüel & Kjaer)    |
| 1 Schwingungsgeberkalibrator              | Typ 4291     | (Brüel & Kjaer)    |
| 1 Phasenmeßgerät                          | Typ 2971     | (Brüel & Kjaer)    |
| 1 UV-Lichtstrahloszillograph (Lumiscrypt) | Typ 25-150   | (Hartmann & Braun) |

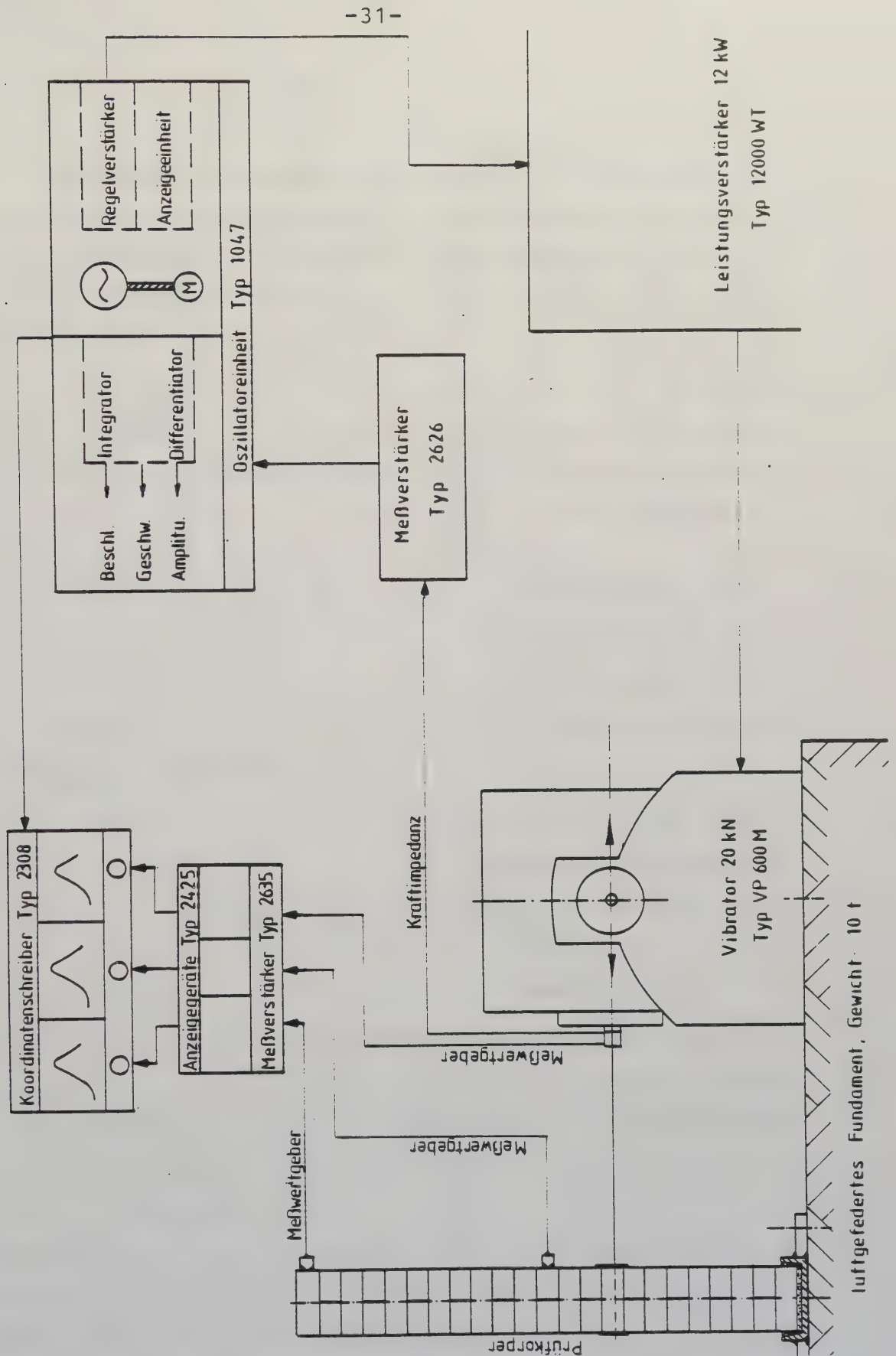


Abbildung 7 Blockschemata der Versuchsanlage



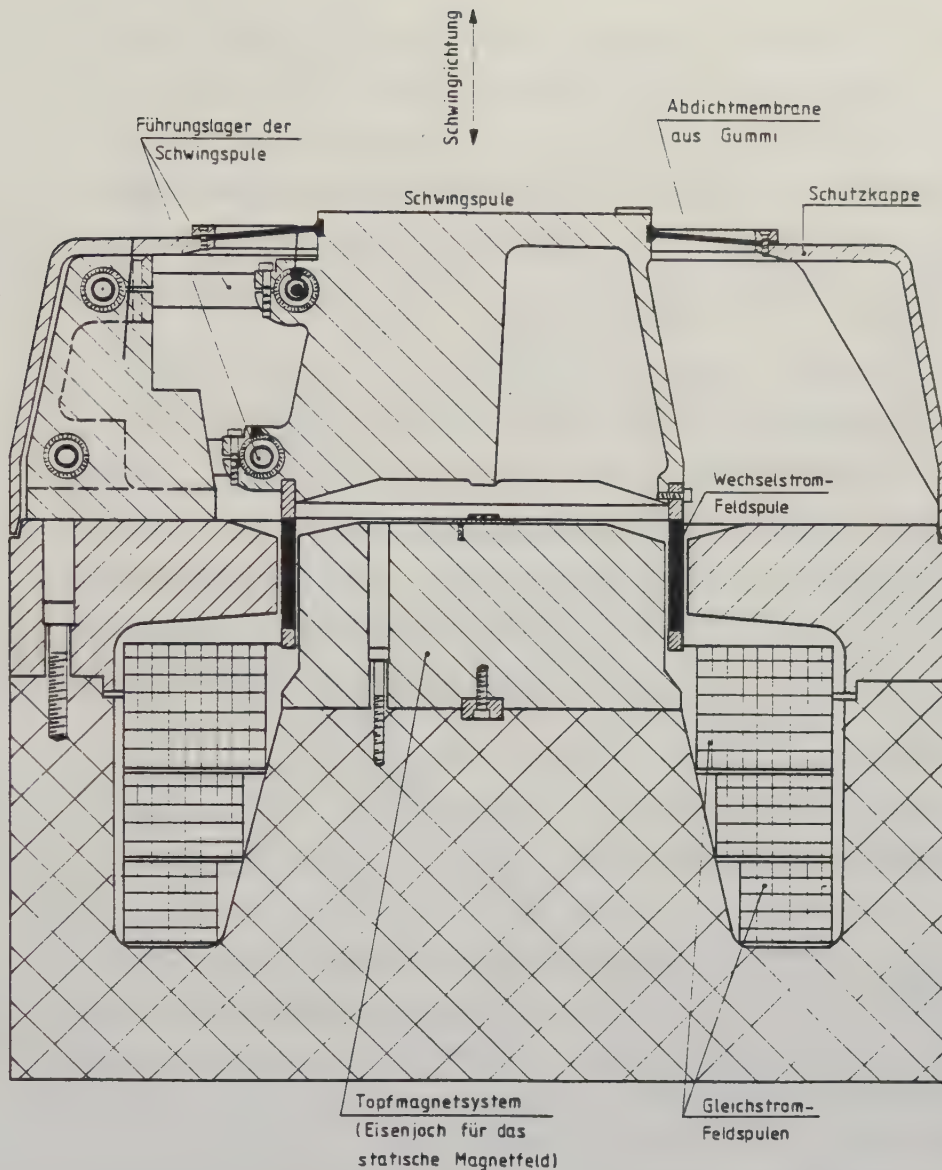


Abbildung 8 Schwingerreger DERRITRON VP 600 M

Ein Oszillatoreinheit liefert ein in der Frequenz kontinuierlich einstellbares Sinussignal, das dem Leistungsverstärker zugeführt wird. Dessen Ausgangssignal erzeugt am Schwingkopf des Erregers entsprechende Schwingbewegungen. Der Schwingspulenkopf ist über eine Kraftmeßvorrichtung und ein dünnes Rohr (Durchmesser 12 mm) mit dem Prüfkörper starr verbunden.

Die Kraftmeßvorrichtung besteht aus drei in einer Ebene in den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks im Abstand von 75 mm in der Mitte des Schwingkopfes angeordneten piezoelektrischen Kraftmeßelementen. Um Einflüsse durch Biegekräfte zu unterdrücken, werden die Kraftmeßelemente mechanisch und elektrisch parallel geschaltet. Diese Kraftmeßelemente liefern ein dem Kraftverlauf exakt entsprechendes, proportionales elektrisches Meßsignal, das, über einen Meßverstärker angepaßt, wieder dem Oszillator-Regelverstärker zugeführt wird. Die Oszillatoreinheit arbeitet nach dem Prinzip der Folgeregelung, das heißt, die über den Leistungsverstärker dem Schwingkopf zugeführte Soll-Signalgröße wird über die Kraftmeßelemente wieder als Ist-Signalgröße zurückgeführt. Durch ständigen Sollwert- Istwertvergleich im Regelverstärker der Oszillatoreinheit wird der jeweils eingestellte Kraftpegel konstant gehalten.

Die Schwingbewegungen des Prüfkörpers werden mit Hilfe piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer abgetastet. Das von den Gebern gelieferte elektrische Meßsignal ist der Beschleunigung des Prüfkörpers im Meßpunkt direkt proportional. Im Meßverstärker wird dieses Signal umgewandelt und wird am Ausgang des Meßverstärkers als Geschwindigkeits- oder Wegproportionale abgeführt.

Für die Durchführung der erforderlichen Experimente mit den Mauerwerkswänden wurden drei verschiedene Versuchsaufbauten gewählt. Beim Prüfaufbau Variante 1 (Abbildung 9) steht die Mauerwerkswand frei, ohne weitere Abstützung. Durch das Vergießen der unteren Steinlage im U140-Profil ergibt sich eine leichte Einspannung. Damit ergibt sich das in Abbildung 9 dargestellte System eines freistehenden Stabes mit Fußpunkteinspannung. Dieser Prüfaufbau eignet sich besonders für Ausschwingversuche und "snap back"-Versuche.

Den Meßverstärkern sind Anzeigegeräte nachgeschaltet, die mit Meßausgängen ausgestattet sind, die eine der Meßwertgrößen proportionale Gleichspannung liefern.

Die graphische Dokumentation der Meßergebnisse wird mit drei Brüel und Kjaer Y-Y-Recorder Typ 2308 vorgenommen. Dabei wird mit Hilfe einer von der Oszillatoreinheit kommenden, der Frequenzgröße proportionalen Gleichspannung auf X-Y-Koordinatenschreibern der Amplitude-Frequenzverlauf in Form von Resonanzkurven aufgezeichnet.

#### 4.3 Versuchskörper

Als Versuchskörper wurden fünf Mauerwerkswände mit  $d = 11,5$  cm und  $d = 24$  cm sowie eine Betonwand mit  $d = 11,5$  cm verwendet. Die Breite der Betonwand und der Mauerwerkswände wurde mit 1000 mm festgelegt. Für Wände ist diese Einheitsbreite sinnvoll, weil dadurch die Aussagen sowohl zur Belastung als auch zu den auftretenden Verformungen pro laufenden Meter gemacht werden können. Bei den Mauerwerkswänden ist die Breite von 1000 mm hinreichend, um durch eine genügende Anzahl von Steinen ein homogenes Verhalten der Wand zu erhalten. Die Höhe der Wände wurde mit 2000 mm gewählt. Mit dem Höhe-zu-Breite-Verhältnis von zwei zu eins ist noch ein Plattenverhalten der Versuchskörper gewährleistet.

Für Versuche zur Eichung des Versuchsstandes wurde als Versuchskörper ein Triplexstab mit den Abmessungen  $l/b/h = 2000/200/43$  mm verwendet.

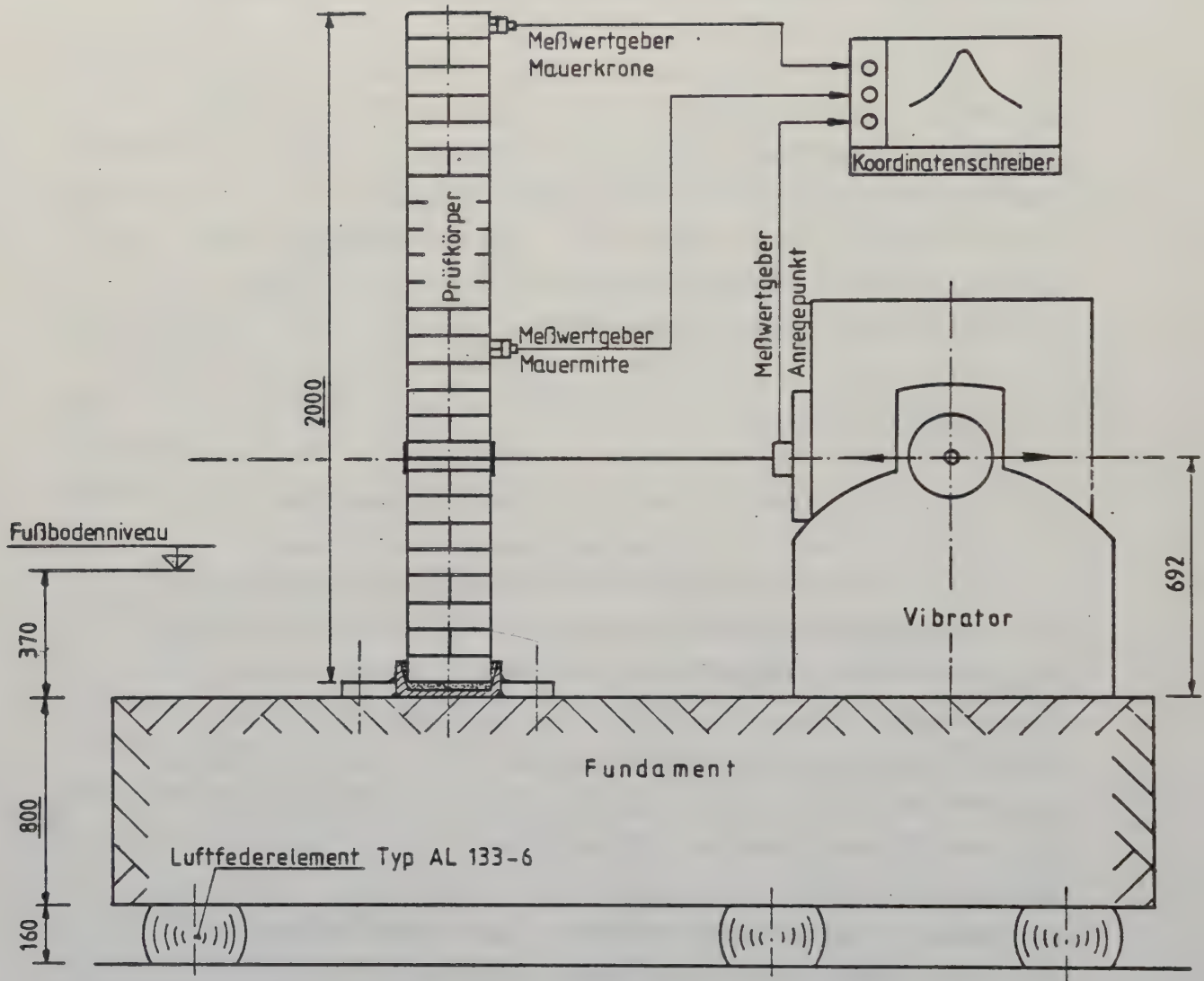


Abbildung 9 Prüfaufbau Variante 1

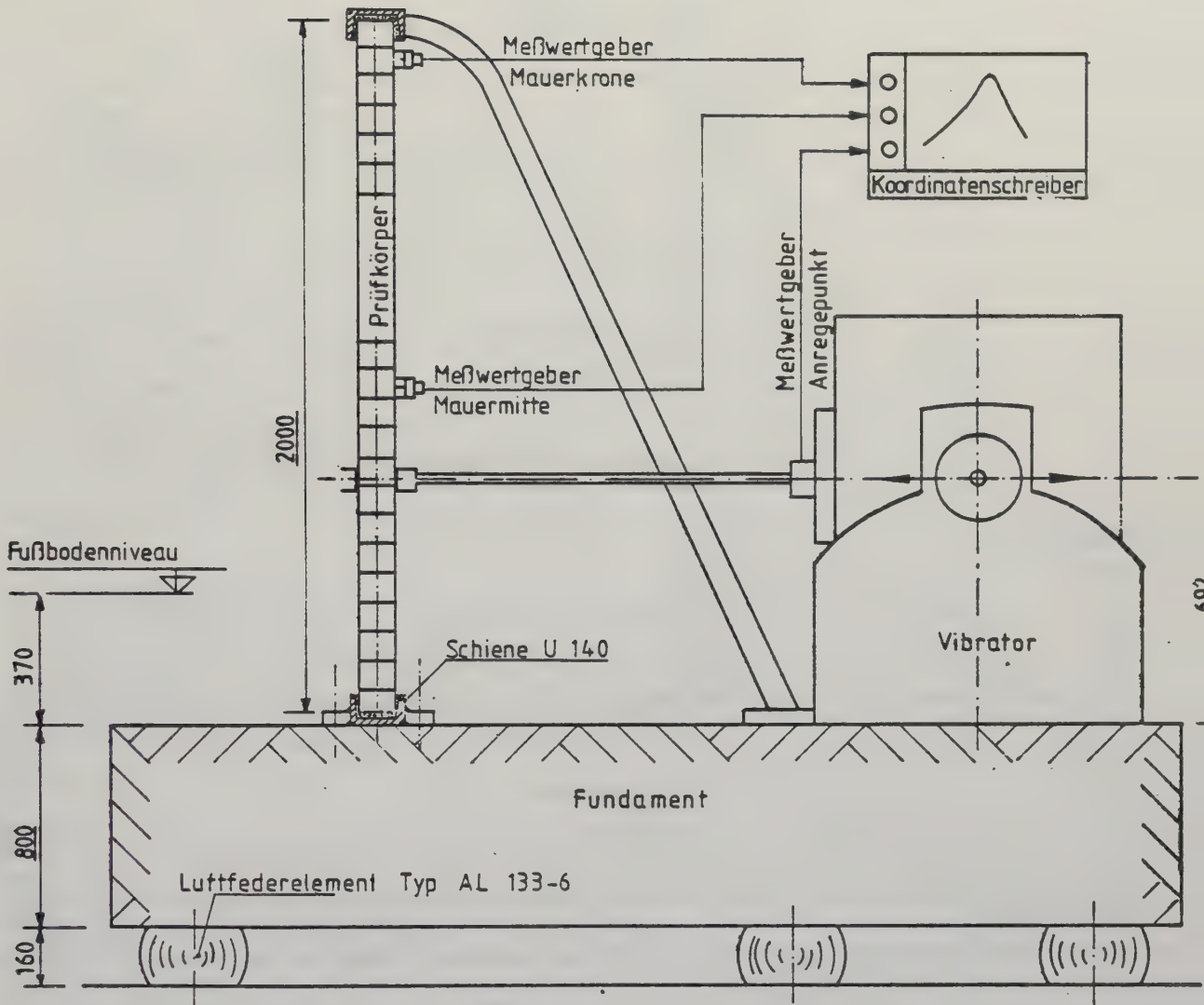


Abbildung 10 Prüfaufbau Variante 2

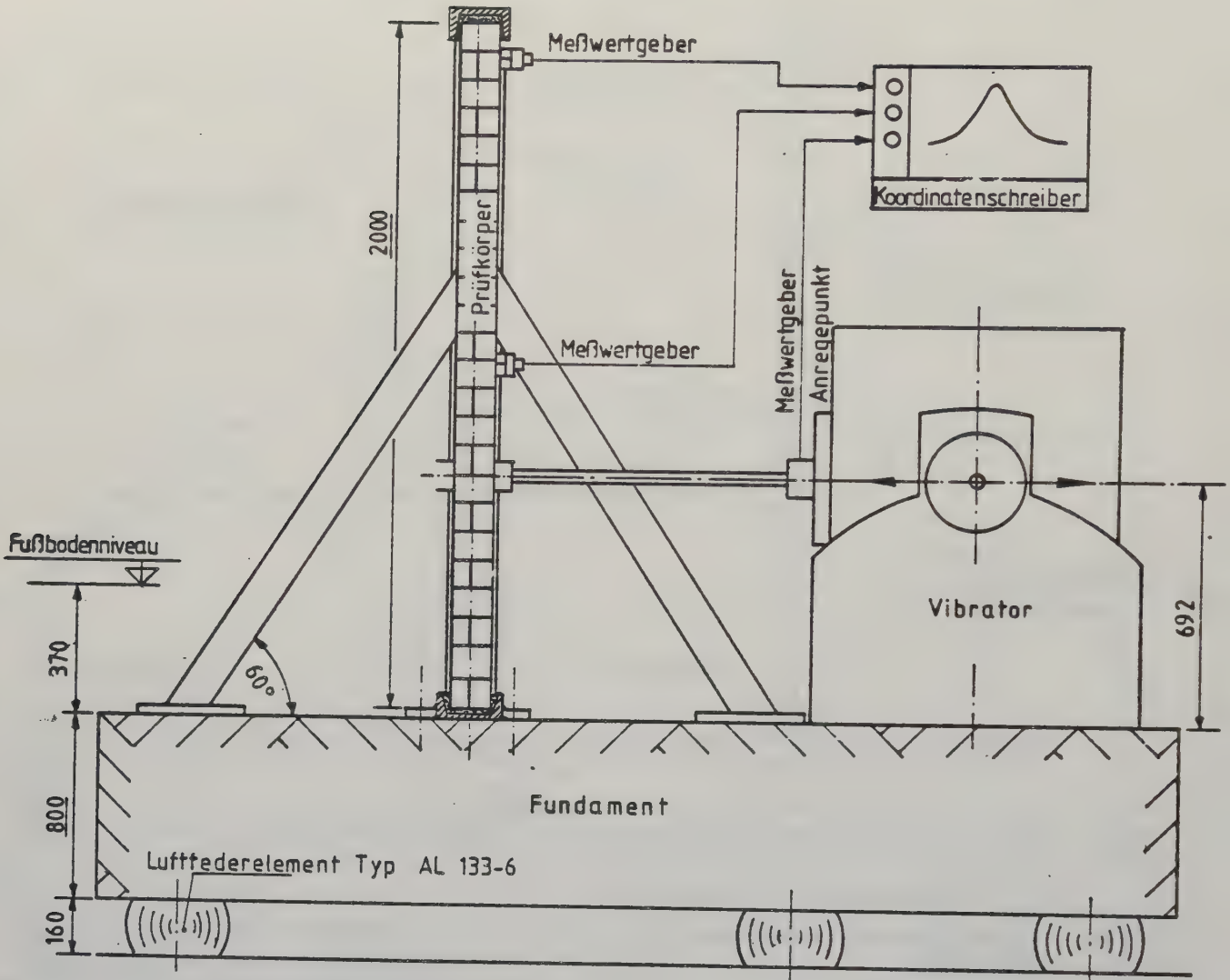


Abbildung 11 Prüfaufbau Variante 3

Beim Prüfaufbau Variante 2 (Abbildung 10) ist zusätzlich zur unteren Steinlage auch die obere Steinlage zu einem U140-Profil mit "Betec Standard"-Vergußmörtel vergossen. Das obere U-Profil wird durch zwei Rohre 2 1/2" gegen das Stahlbetonfundament abgestützt. Durch diese Abstützung der Mauerkrone ergibt sich das in Abbildung 10 dargestellte statische System eines freistehenden Stabes mit leichter oberer und unterer Einspannung. Durch die Verbindung des oberen und unteren U-Profiles mit Zugstangen kann die Mauerwerkswand unter Vorspannung gesetzt werden. Dieser Prüfaufbau wurde vor allem zur Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Auflasten entwickelt.

Mit dem Prüfaufbau Variante 3 (Abbildung 11) wurden Versuche mit Mauerwerkswänden, der Betonwand und dem Triplexstab durchgeführt. Bei diesem Prüfaufbau wird das obere und untere U140-Profil durch zwei IPB140-Profile verbunden. Diese beiden IPB140-Profile sind unter 60° zweiseitig auf das Stahlbetonfundament abgestützt. Alle Verbindungen der Stahlkonstruktion sind als Schweißverbindungen ausgeführt. Durch die sehr große Steifigkeit der Stahlkonstruktion gegenüber der Mauerwerkswand und auch der Betonwand ergibt sich als statisches System ein zweiseitig gelenkig gelagerter Stab mit zweiseitiger leichter Einspannung. Bei den Versuchen mit dem Triplexstab liegt keine Einspannung vor, da der Stab gelenkig an die Stahlkonstruktion angeschlossen wird.

Die Einleitung der Erregerkraft in die Prüfkörper erfolgt durch ein Aluminiumrohr (Durchmesser 12 mm) 692 mm über dem Stahlbetonfundament. Diese Höhe ist

durch den Vibrator vorgegeben. Bei den Mauerwerkswänden erfolgt eine Querverteilung der Erregerkraft durch zwei U 60 (Abbildung 12).

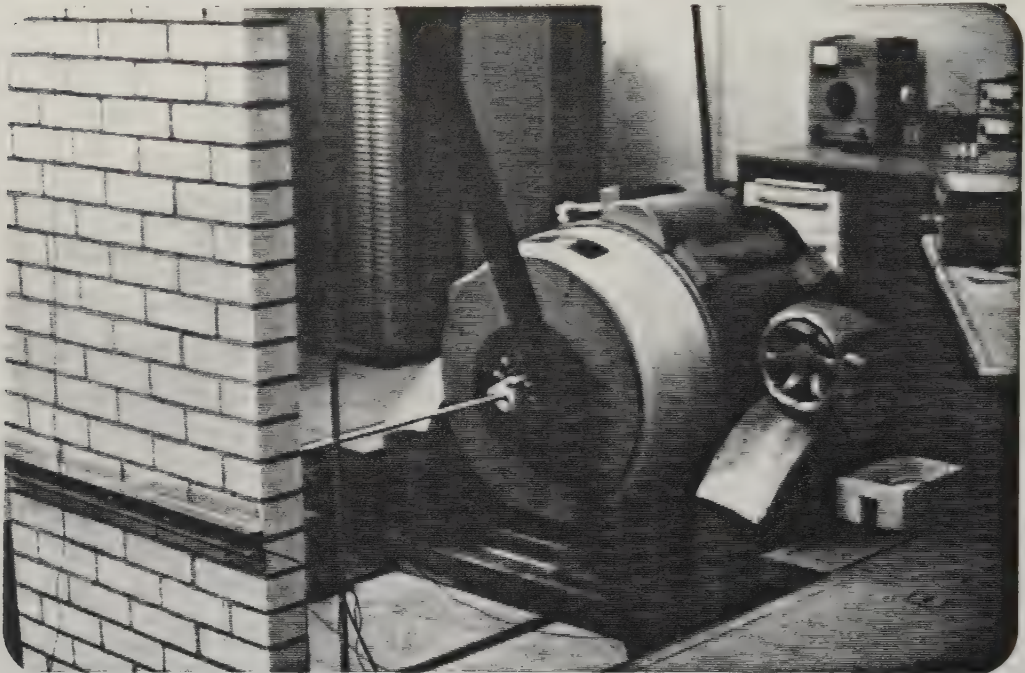


Abbildung 12 Kopplung mit dem Schwingungserreger  
(Ergänzung zu Abbildung 10 Prüfaufbau  
Variante 2)

Bei der Betonwand und dem Triplexstab wird die Erregerkraft punktförmig in Wandschnitte beziehungsweise in Stabschnitte eingeleitet. Bei den Ausschwingversuchen wird die Erregerkraft ohne direkte Kopplung zwischen Erreger und Prüfling über die Anregung des luftgefederten Stahlbetonfundamentes in den Wandfluß eingeleitet.

#### 4.3.1 Herstellung der Mauerwerkswände

Die Mauerwerkswände ( $d = 11,5 \text{ cm}$  und  $d = 24 \text{ cm}$ ) wurden nach DIN 1053 Blatt 1 (36) hergestellt. Als Mauersteine wurden Kalksandvollsteine nach DIN 106 Teil 1 (37) mit der Bezeichnung DIN 106-KS 12 - 1,6 - NF verwendet. Als Mauer-  
mörtel wurde Mörtel Gruppe III (Zementmörtel) nach DIN 1053 Blatt 1 (36) verwendet.

Die Mauerwerkswände wurden mit  $d = 11,5 \text{ cm}$  im Läuferverband und die mit  $d = 24 \text{ cm}$  im Blockverband errichtet.

Abbildung 13 zeigt eine Mauerwerkswand mit  $d = 11,5 \text{ cm}$  im Läuferverband mit dem Prüfaufbau Variante 2. Die Versuche mit den Mauerwerkswänden wurden circa 21 Tage nach der Errichtung durchgeführt.

#### 4.3.2 Herstellung der Stahlbetonwand

Die Stahlbetonwand wurde in gehobelter Holzschalung flach liegend hergestellt. Die Abmessungen und die Bewehrung sind aus Abbildung 14 zu ersehen.

Die Sollabmessungen sind  $h/b/d = 2000/1000/115 \text{ mm}$ . Als Längs- und Querbewehrung sind Durchmesser 6 mm der Stahlgüte BSt 42/50 RU eingelegt. (Längsbewehrung  $\phi 6 \text{ e} = 10 \text{ cm}$ , Querbewehrung  $\phi 6 \text{ e} = 25 \text{ cm}$ ). Die Betondeckung beträgt 1 cm.

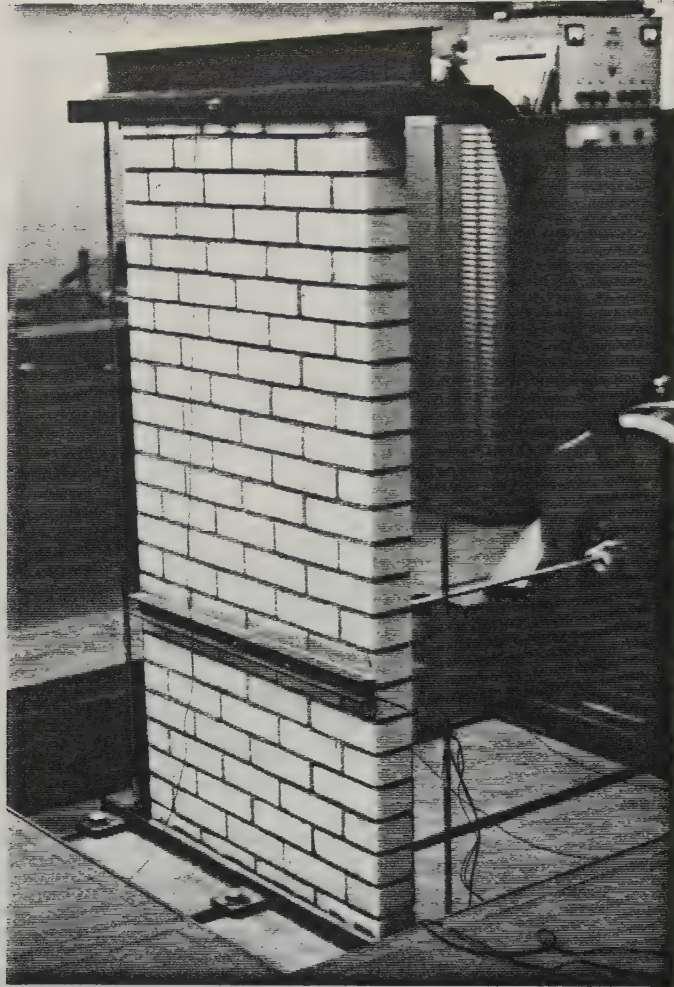


Abbildung 13 Prüfaufbau Variante 2 mit Mauer-  
werkswand  $d = 11,5 \text{ cm}$

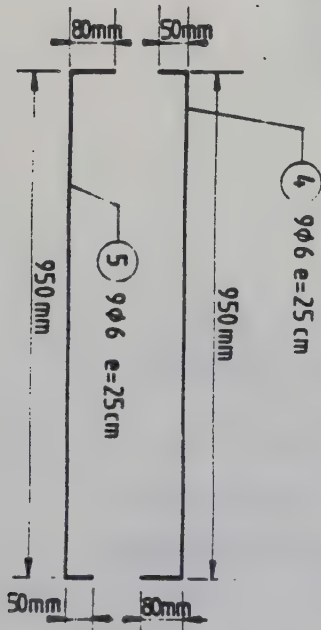
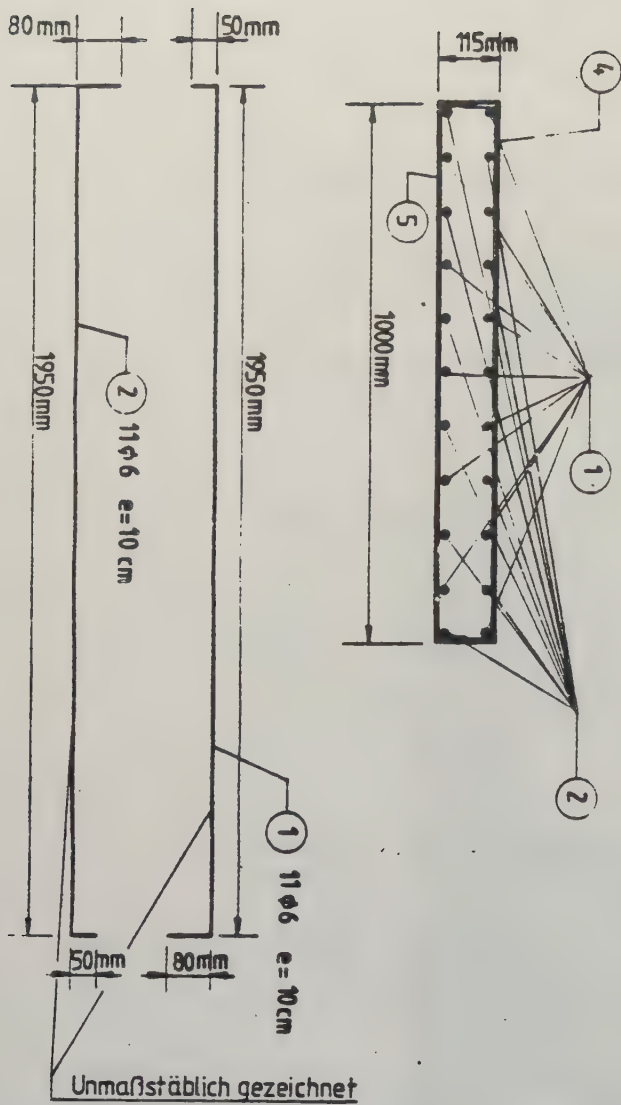
Der Beton der Güte B 25 setzte sich zusammen aus  $300 \text{ kp/m}^3$  Portlandzement PZ 35 F,  $70 \text{ kp/m}^3$  Quarzmehl und aus den Zuschlagstoffen (Rheinkies) mit 64 % Körnung 0 bis 3, 15 % 3 bis 7 und 21 % 7 bis 15 mm. Der Wasserzementwert, bezogen auf Zement und Quarzmehl, betrug  $w = 0,60$ .

Der Beton wurde durch Innenrüttler verdichtet und 7 Tage bei  $20^\circ \text{C}$  Temperatur nachbehandelt (gewässert). Beim Betonieren der Stahlbetonwand wurden 3 Probewürfel mit den Abmessungen  $20/20/20 \text{ cm}$  hergestellt. Die Ergebnisse der Betonprüfung sind in Tabelle 1 dargestellt.

| Probe       | Alter<br>Tage | Abmessungen<br>(mm) x 10 | Masse<br>(kg) | Rohdichte<br>( $\text{kg/dm}^3$ ) | Höchst<br>last<br>(kN) | Druck-<br>festig-<br>keit<br>( $\text{N/mm}^2$ ) |
|-------------|---------------|--------------------------|---------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|
| 1           | 28            | 20/20/20                 | 18,81         | 2,35                              | 1330                   | 33                                               |
| 2           | 28            |                          | 19,92         | 2,49                              | 1300                   | 33                                               |
| 3           | 28            |                          | 19,92         | 2,49                              | 1320                   | 33                                               |
| Mittelwert: |               |                          |               |                                   | 2,44                   | 33                                               |

Tabelle 1 Ergebnisse der Betonprüfung

Für den Versuchsaufbau Variante 3 wurde zur Verankerung der Stahlbetonwand im Stahlgerüst am Kopf- und Fußende der Betonwand je ein Profil U 140 ( $l = 150 \text{ cm}$ ) mit Vergußmörtel (Betec Standard) befestigt (Abbildung 15). Die Versuche mit der Stahlbetonwand wurden 30 Tage nach dem Betonieren begonnen.



Beton B25  
Stahl BSt 42/50 RU

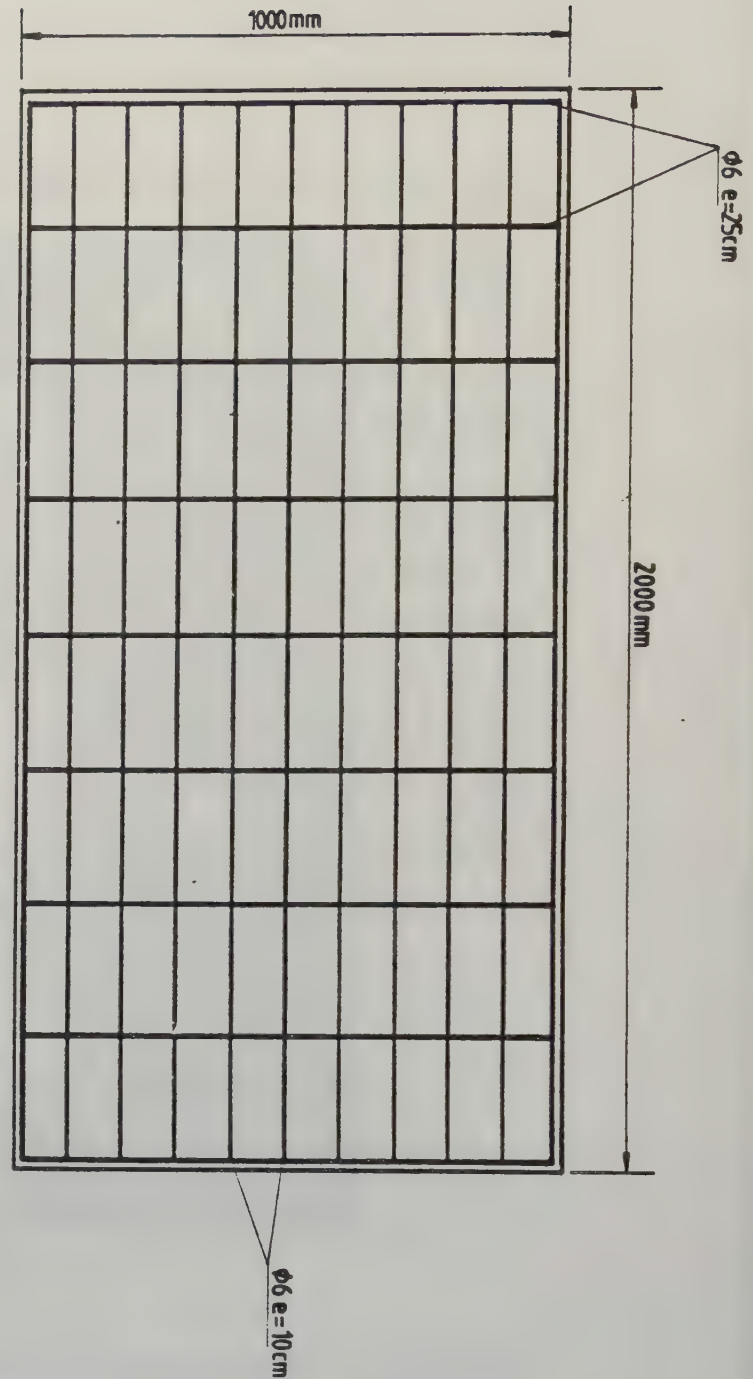


Abbildung 14 Stahlbetonwand



Abbildung 15 Betonwand, Versuchsaufbau Variante 3

#### 4.3.3. Herstellung des Triplexstabes

Der Triplexstab wurde aus drei Flachstahlplatten (RSt 37/2) mit zwei Gummizwischenlagen ( $d=1,5$  mm) hergestellt. Der Aufbau des Stabes ist aus Abbildung 16 zu ersehen.

Der Triplexstab setzt sich als Sandwichkonstruktion aus den folgenden Teilen zusammen:

1. Flachstahl l/b/d = 2000/200/20 mm
2. Flachstähle l/b/d = 1920/180/10 mm
3. Gummipplatten l/b/d = 1920/200/1,5 mm

Die einzelnen Teile sind mit dem Klebemittel "technicoll 8051" miteinander verbunden. Die Gummischnittkanten sind unter  $45^{\circ}$  angeschrägt.

Für den Versuchsaufbau Variante 3 sind für die obere und untere Verankerung des Triplexstabes im Stahlgerüst je zwei Bohrungen Durchmesser 13,5 mm im mittleren Flachstahl 2000/200/20 mm vorgesehen. Die Lasteinleitung erfolgt durch eine Bohrung Durchmesser 13,5 mm durch die drei Flachstähle.

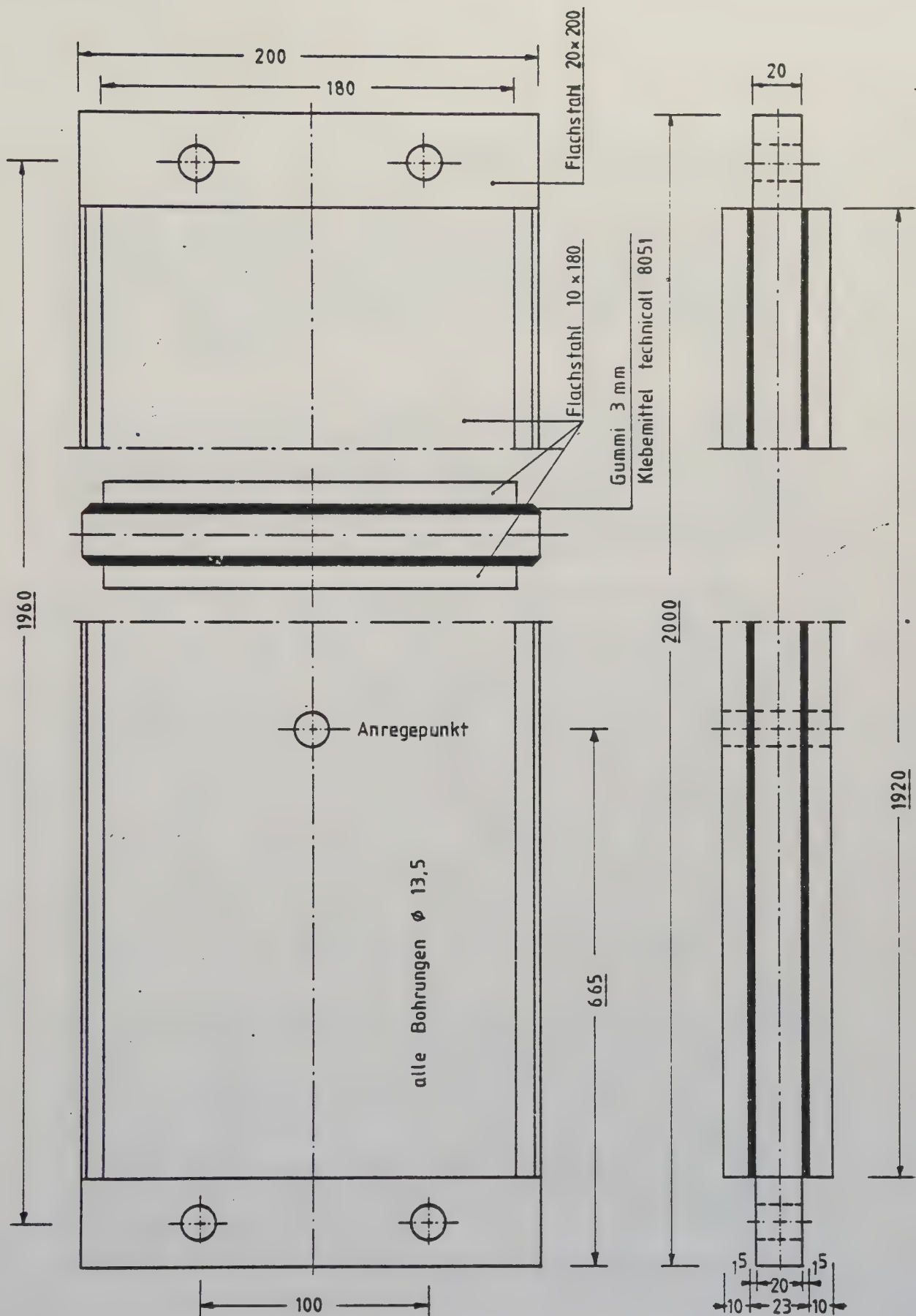


Abbildung 16 Triplexstab

## 5. Durchführung der Messungen

Bei allen Versuchen mit den Mauerwerkswänden, der Betonwand und dem Triplexstab werden die Schwingungsamplituden mit piezoelektrischen Gebern gemessen. Bei den Versuchen mit den oben nicht gestützten Wänden (Prüfaufbau Variante 1) war der Geber zunächst an der Mauerkrone, später einheitlich bei allen Versuchen in Mauermitte angebracht. Die Befestigung erfolgt über ein auf dem Prüfkörper mit Zweikomponentenklebstoff aufgeklebtes Eisenplättchen, auf dem der Geber mit einem Haftmagneten gehalten wird.

Der Meßbereich des Gebers beträgt 1 Hz bis 8 kHz mit einer Signalauflösung von  $10^{-5} \text{ m/s}^2$ . Das vom Geber kommende beschleunigungsproportionale Signal wird in einem Meßwertverstärker durch zweimaliges Integrieren in ein der Wegamplitude proportionales Signal umgewandelt und über einen Impedanzwandler auf einen Lichtstrahlschreiber (Lumiscrypt, Hartmann & Braun) geführt. Der Amplitudenwert wird dabei durch ein parallel geschaltetes Anzeigegerät sichtbar gemacht. Durch Filtereinstellung am Ladungsverstärker und durch die Wahl der Galvanometer im Lichtstrahlschreiber wird der Meßbereich nach unten auf 1 Hz und nach oben auf 1 kHz begrenzt. Die maximal mögliche Aufzeichnungsgröße wird durch die Schreibpapierbreite auf 150 mm eingeschränkt. Der Papierdurchlauf kann stufenweise bis auf 2 m/s gesteigert und dabei der Aufzeichnung eine in 10er Schritten abgestufte Zeitmarke überlagert werden. Die Anregung der Prüfkörper erfolgt durch den in Kapitel 4.2.2 beschriebenen elektrodynamischen Schwingungserreger DERRITRON VP 600 M.

Beim Prüfaufbau Variante 1 nach Abbildung 9 wurde für die Messung der Ausschwingversuche auch eine manuelle Anregung durchgeführt. Für Vorversuche wurde die statische Auslenkung der Mauerkrone (snap-back-Methode) und das Ausschlagen der Wand mit einem Bleihammer untersucht.

Bei den Prüfaufbauten Variante 2 und 3 erwies sich eine Anregung über den Fundamentblock als geeignetste Lösung für die Ausschwingversuche. Dabei war der Schwingkopf des Erregers von den Prüflingen getrennt und mit einer zusätzlichen Gewichtsmasse beschwert worden. Durch diese Kraft (Schwingkopfmasse  $\times$  Beschleunigung des Schwingkopfes) ergab sich eine noch ausreichende Fundamentalschwingung, um bis zu den ersten Rißbildungen an den Wänden Ausschwingversuche durchführen zu können. Die Strukturen wurden dabei jeweils im Resonanzpunkt angeregt und dann, bei schon laufendem Registriergerät, die Erregerquelle abgeschaltet. Dabei geht der Schwingkopf sehr rasch in Ruhestellung. Das Fundament folgt nach einem Amplitudensprung, der an der Mauer kaum noch erkennbar wird, in Gegenphase der Wandschwingung.

Für die Ermittlung der Dämpfung aus der Resonanzkurve beziehungsweise aus der Erregerkraft bei Resonanz wurden die Resonanzkurven mit abfallender Frequenz aufgezeichnet. Die Änderungsgeschwindigkeit der Frequenz betrug 0,1 Hz pro Sekunde. Das Durchfahren der Halbwertsbreite (Niveau der halben Energie des Maximums) einer Resonanzkurve mit  $f = 1$  Hz dauerte damit 10 s.

Die relativ langsame Durchlaufgeschwindigkeit war erforderlich, um eine ausreichende Einschwingzeit für das Schwingungssystem zu erhalten. Die Regelkonstante an der Oszillatoreinheit war auf 20 dB/s eingestellt. Höhere Regelgeschwindigkeiten führten zu Regelschwingungen, kleinere hätten eine weitere Herabsetzung der Durchlaufgeschwindigkeit bedingt.

## 6. Versuchsergebnisse

### 6.1 Ausgewählte Versuche

Die Ausschwingkurve auf Seite 52 (Kalksandsteinwand 11,5 cm, Anregung von Hand, Prüfaufbau Variante 1 ohne Vorspannung) hat einen fast linearen Verlauf der abnehmenden Amplitude  $X_0$  ( $X = X_0 - X_{0+1}$  bleibt dabei weitgehend konstant). Dies bedeutet, daß insbesondere am Beginn des Ausschwingvorganges eine weitgehend dem Schwingweg proportionale Dämpfung vorliegt. Bei den ermittelten kleinen Dämpfungswerten zwischen 2,4 % und 3,2 % gilt für eine Schwingperiode näherungsweise

$$D \approx \frac{1}{\pi} \frac{\Delta X}{X_0 + X_0 + 1} \quad [17]$$

mit  $X$  = Amplitude.

Mit  $\Delta X \approx$  konstant steigt  $D$  daher mit abnehmender Amplitude an. Dies ist ein Gegensatz zu einem geschwindigkeitsproportionalen Dämpfungsverhalten, bei dem mit nach einer e-Funktion abnehmenden Amplitude mit kleiner werdender Schwingungsamplitude eine Abnahme der Dämpfung festzustellen ist.

Bei kleiner Vorspannung (Ausschwingkurve Seite 53) ist aus der höheren Eigenfrequenz im wesentlichen ein Anstieg der mechanischen Impedanz (Steifigkeit) des Systems festzustellen. Ein dominierend wegabhängiges Dämpfungsverhalten ist aber bei diesem Beschleunigungsniveau immer noch vorhanden.

Messpunkt: Mauerkrone

1 s

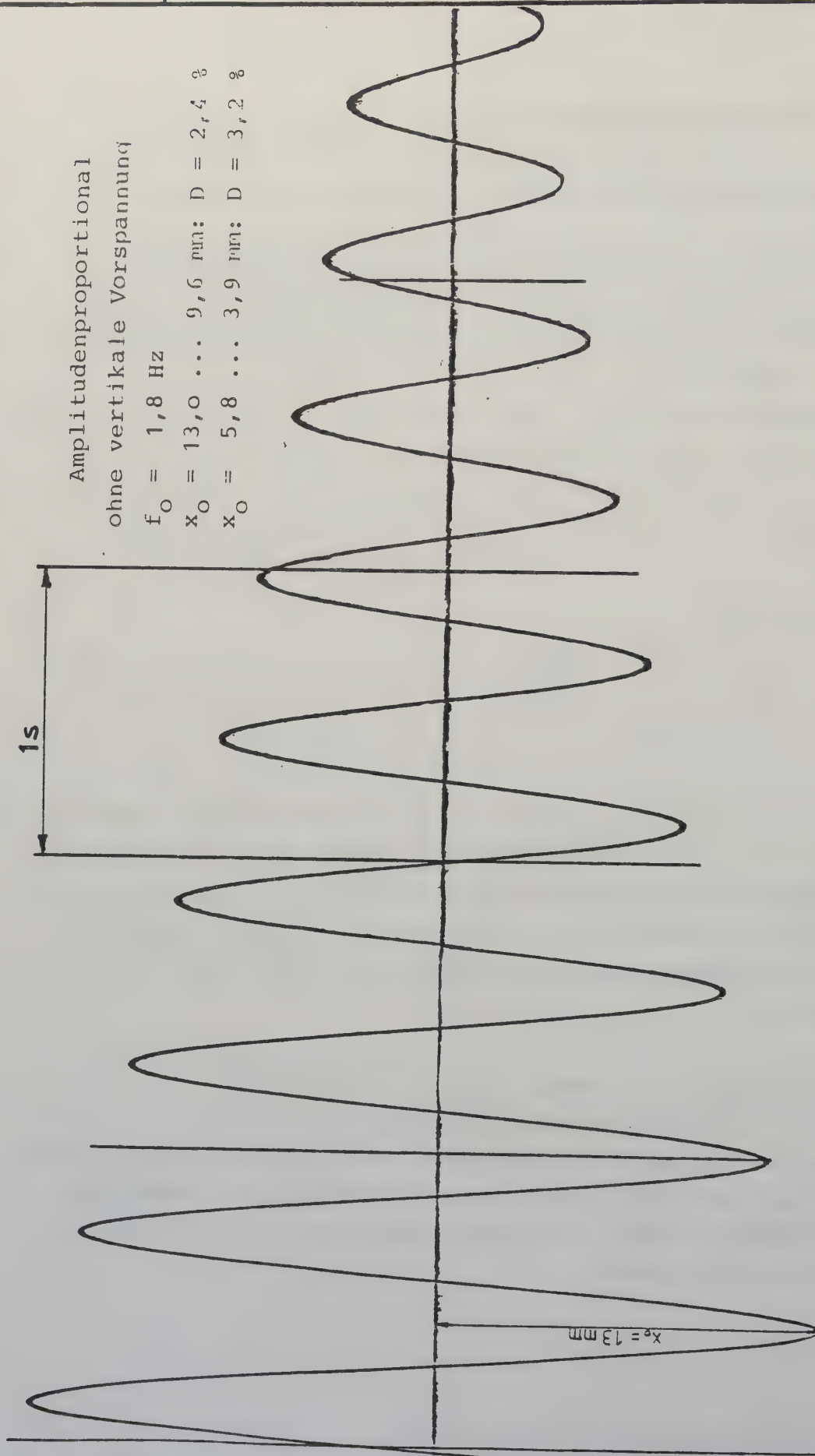
Amplitudenproportional

ohne vertikale Vorspannung

$f_0 = 1,8 \text{ Hz}$

$x_0 = 13,0 \dots 9,6 \text{ mm}$   $D = 2,4 \%$

$x_0 = 5,8 \dots 3,9 \text{ mm}$   $D = 3,2 \%$



Meßpunkt: Mauerkrone

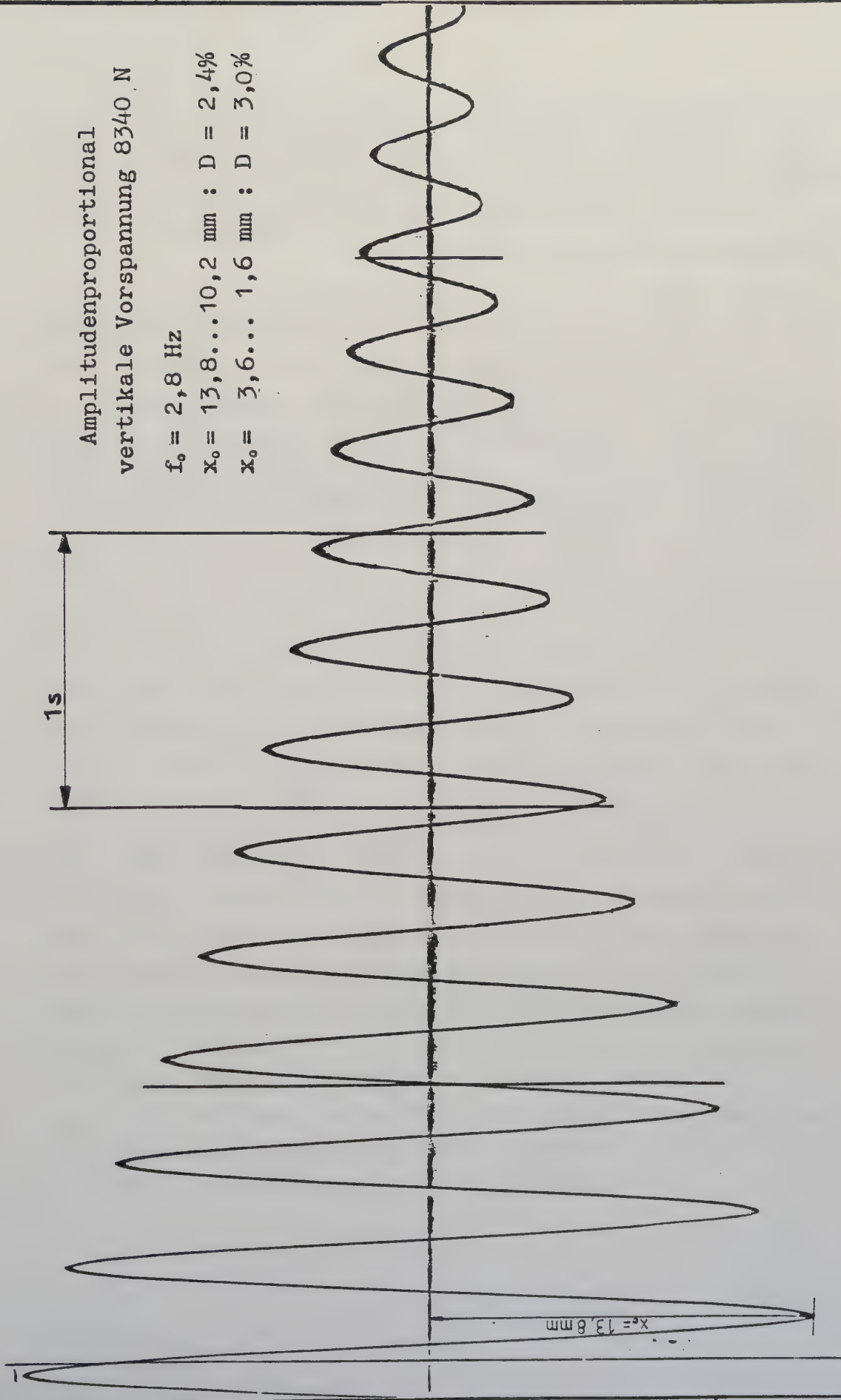
Amplitudenproportional  
vertikale Vorspannung 8340 N

$f_0 = 2,8 \text{ Hz}$

$x_0 = 13,8 \dots 10,2 \text{ mm} : D = 2,4\%$

$x_0 = 3,6 \dots 1,6 \text{ mm} : D = 3,0\%$

1 s



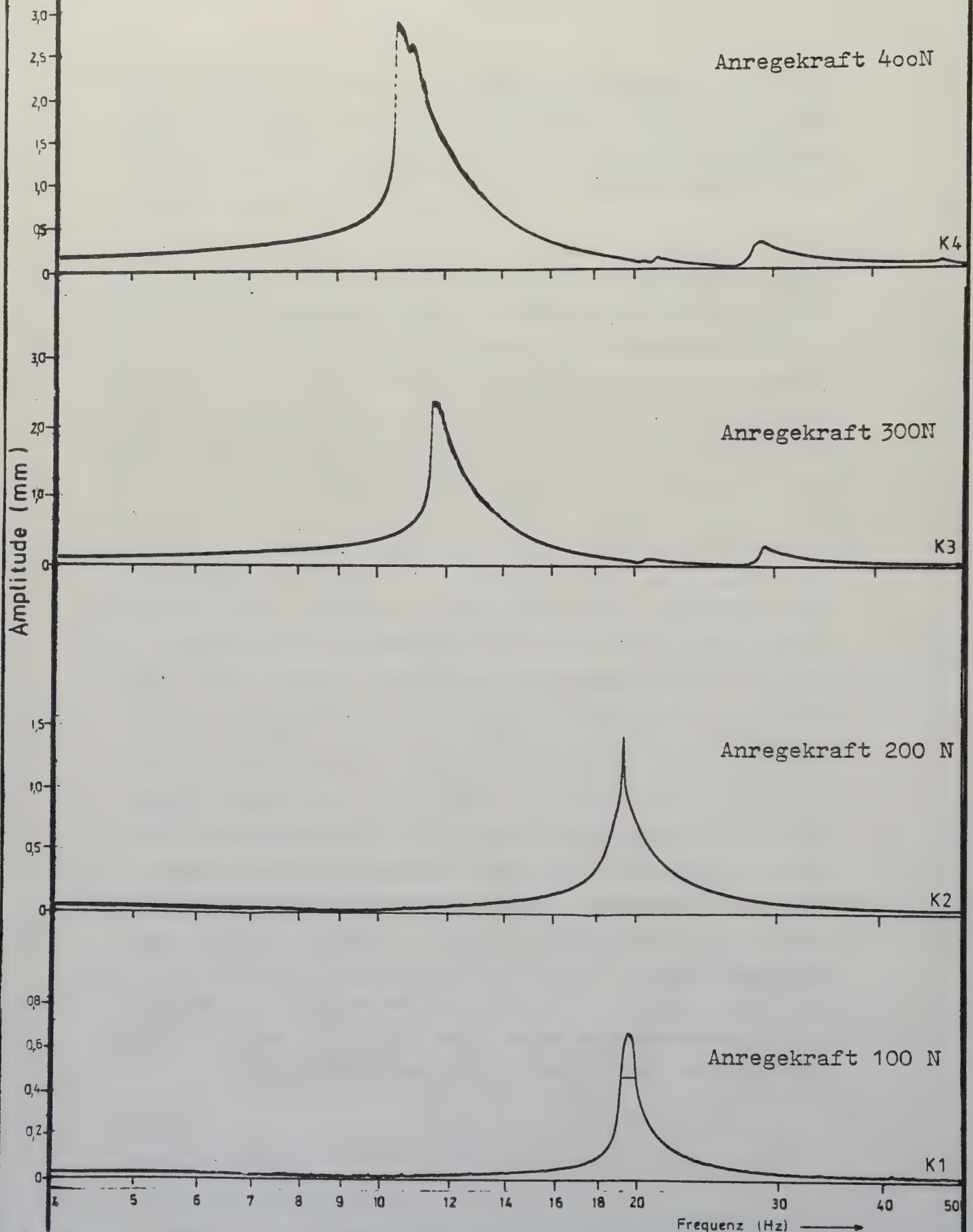
Mit zunehmender Vorspannung (Ausschwingkurven Seite 113-118) ändert sich jedoch das Dämpfungsverhalten. Die Dämpfung  $D$  tendiert nun mit kleiner werdender Schwingamplitude dazu, abzunehmen. Der Ausschwingvorgang klingt zunehmend nach einer e-Funktion ab.

Ohne oder mit nur geringer vertikaler Vorspannung wird der elastische Bereich der Haftung zwischen Mörtel und Steinen am Fuß der Mauerwerkswand sehr schnell überschritten. An den Außenzonen der Fugen entstehen bereits feinste Rißstrukturen, in denen sich beim Aufweiten und wieder Schließen bei jeder Schwingperiode ein Dämpfungsanteil durch trockene Reibung einstellt.

Durch die Abstützung der Mauerkrone beim Prüfaufbau Variante 2 ist die Eigenfrequenz der Mauer gegenüber Prüfaufbau Variante 1 von 2,8 Hz auf circa 20 Hz (Seite 56 und 57) angestiegen.

Die Ermittlung der Dämpfung aus der Halbwertsbreite der Resonanzkurve ergibt nur bei der Kurve K1 (Seite 56) bei einer Anregekraft von 100 N eindeutige Werte. Mit steigender Anregekraft ist schon bei Kurve K2 (Seite 56) ein Absinken der Resonanzfrequenz feststellbar. Die Kurven K1 und K2 wurden mit von niedriger zu hoher Frequenz ansteigender Anregung durchfahren. Dabei betrug die Änderungsgeschwindigkeit 1/2 Oktave/Minute. Während bei Kurve K1 noch auf ein weitgehendes linear-elastisches Verhalten zu schließen ist, zeigen sich ab Kurve K2 bereits gravierende Veränderungen der Wandstruktur. Durch die fortschreitende Ribildung zwischen Stein und Mörtel und im Mörtel selbst läuft die stetig abgleitende Eigenfrequenz der Wand der ansteigenden Anregungsfrequenz entgegen. Der Resonanzgipfel wird dadurch nur sehr kurz erreicht. Bei zu schnellem Durchfahren ergibt sich dabei eine zu kleine Gipfelhöhe. Die Dämpfungsermittlung aus der Halbwertsbreite der Kurve K2 ergibt daher zu kleine Werte gegenüber den tatsächlichen Werten bei dem vorgegebenen Beanspruchungsniveau. Um diese offensichtliche Fehlerursache einzuschränken, wurden die nachfolgenden Versuche Kurven K3 bis K8 (Seite 56 und 57) bei der oberen Frequenz beginnend mit abfallender Anregungsfrequenz durchlaufen. Schon bei den Kurven K3 und K4 zeigt sich deutlich, wie die Resonanzschwingung sehr plötzlich nach Erreichen der maximalen Amplitude in sich zusammenbricht.

vertikale Vorspannung 8340 N



vertikale Vorspannung 21 kN

Anregekraft 2000N

K 8

vertikale Vorspannung 8340 N

Anregekraft 1500N

K 7

Anregekraft 1000N

K 6

Anregekraft 600N

K 5

Amplitude (mm)

Frequenz (Hz) →

Der Resonanzzustand endet ganz abrupt. Die Resonanzkurve, die sich im Idealzustand ähnlich der Kurve K1 als symmetrische Glockenkurve darstellt, ist als solche nur halb vorhanden. Die aus der Halbwertsbreite der Kurve K3 ermittelte Dämpfung ist daher deutlich zu klein. Bei der Kurve K4 wird dieser Einfluß zum Teil wieder dadurch kompensiert, daß der Resonanzgipfel mit der Anregungsfrequenz stufenweise abwärts gleitet. Bei sehr langsam abwärts gleitender Anregungsfrequenz wie bei den Kurven K6 bis K8 (Seite 57) können sich bei der Ermittlung der Dämpfung aus der Halbwertsbreite auch zu große Werte ergeben. Die Kurven K5 bis K8 zeigen über den gesamten Frequenzbereich hinweg Unregelmäßigkeiten, die sich durch die Reibungskräfte in der verschraubten Abstützkonstruktion der Mauerkrone deuten lassen. Für die weiteren Versuche wurde diese Schraubkonstruktion verschweißt.

Der Ausschwingversuch Seite 59 zeigt, daß die Eigenfrequenz auf 2,6 Hz abgesunken ist. Diese Abnahme der Frequenz ergibt sich durch die Rißbildung in der Mauerwerkswand infolge der vorangegangenen Versuche.

Auffallend ist die hohe Dämpfung zu Beginn des Ausschwingungsvorganges, die im wesentlichen aus den Reibeffekten in den Rissen resultiert. Bei kleiner Amplitude werden dann die Dämpfungen wieder überwiegend von viskoelastischen Vorgängen bestimmt.

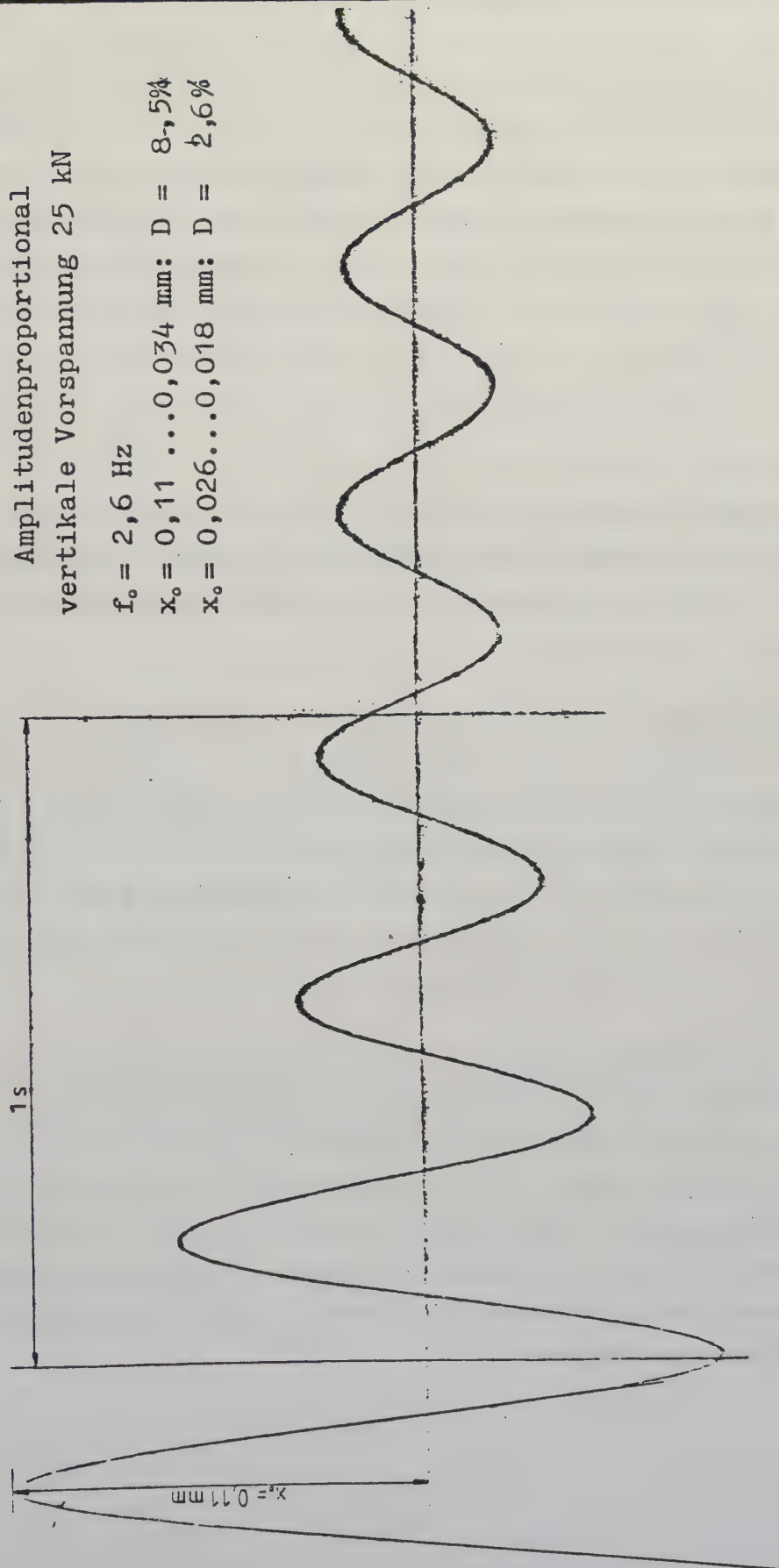
Messpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional  
vertikale Vorspannung 25 kN

$f_0 = 2,6 \text{ Hz}$

$x_0 = 0,11 \dots 0,034 \text{ mm}$ :  $D = 8,5\%$

$x_0 = 0,026 \dots 0,018 \text{ mm}$ :  $D = 2,6\%$



Mit der bereits deutlich geschädigten Mauer wurden die Versuche analog K1 bis K8 (Seite 56/57) unter erhöhter vertikaler Vorspannung fortgesetzt. Bei den Versuchen K3 bis K18 (Seite 124 bis 128) beträgt die Frequenzänderung 0,1 Hz pro Sekunde. Diese lineare Frequenzänderung ergibt auch bei den Meßschrieben einen linearen Frequenzmaßstab, was eine wesentlich einfachere und genauere Auswertung ermöglicht.

Die in den Kurven K9 und K10 (Seite 124) bei 9,8 Hz auftretenden kleineren Resonanzgipfel sind durch eine Resonanzerscheinung an der Stahlkonstruktion der Mauerabstützung (Stahlrohre) entstanden. Die Erscheinung konnte durch Füllen der Stahlrohre mit Sand unterdrückt werden (Kurven K11 bis K18).

Die Unsymmetrie der Kurven K11 bis K18 (steiler Abfall zur niederen Frequenz hin) deutet auf eine unterlineare Federkennlinie des Systems hin. Das heißt, eine durch eine Kraft herbeigeführte Auslenkung wird mit zunehmender Kraft überproportional größer. Insbesondere bei den Kurven K16 bis K18 wird das Nachgeben der Wandstabilität als Stufe im Gipfelbereich sichtbar.

Für die Dämpfungsbestimmung aus der Halbwertsbreite sind die Kurven K11 bis K18 wegen der Unlinearität des Systems nur unter Vorbehalten verwendbar. Ein Maß für die Dämpfung ist aber auch mit dem Quotienten Anregekraft durch Geschwindigkeit (der mechanischen Impedanz) gegeben. Aus dem Anstieg der mechanischen Impedanz mit zunehmender Erregerkraft ist daher auch unmittelbar ein Anstieg der Dämpfung abzuleiten.

Zusammenfassung der Versuche mit der 1. Kalksandsteinwand:

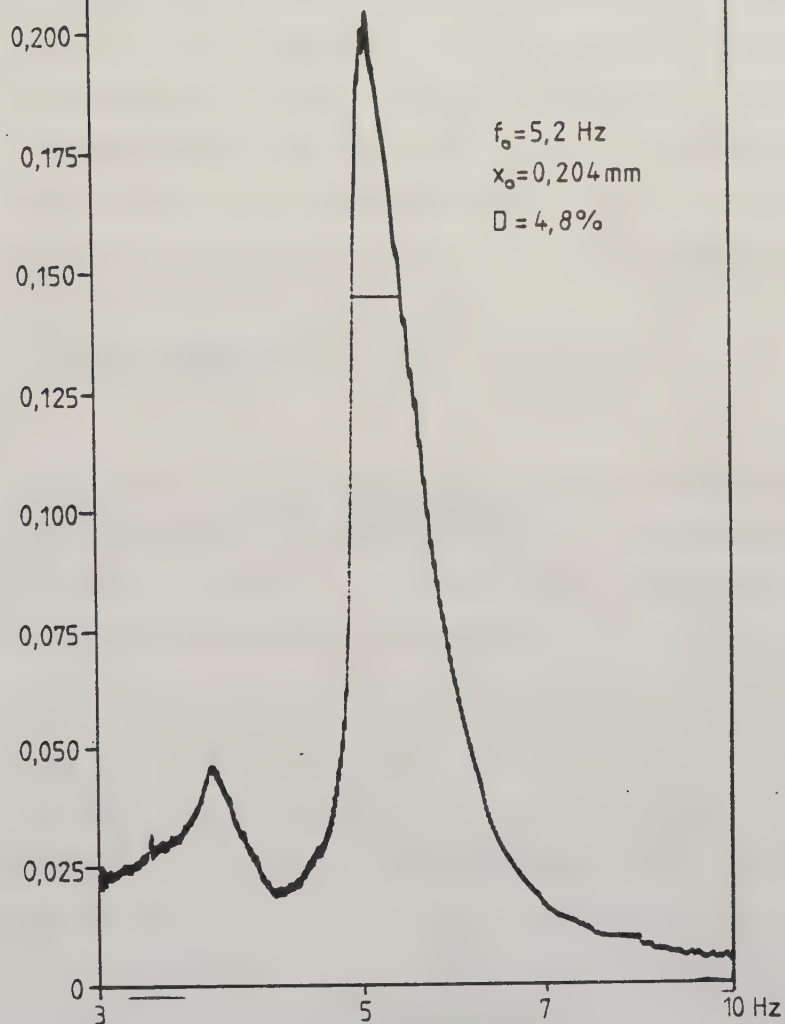
- Die Auswertung der Dämpfung aus der Halbwertsbreite der Kurven ist nur bei kleiner Schwingungsamplitude fehlerfrei.
- Die Resonanzgipfel sind nur deutlich ausgeprägt, wenn sie sehr langsam mit abwärtsgleitender Frequenz durchfahren werden.
- Die Gleitgeschwindigkeit der Frequenz soll circa 0,1 Hz/sec. sein. Die Regelgeschwindigkeit der Erregerkraft soll circa 10 dB/sec. betragen.

Aus der Erkenntnis bei den Versuchen mit der 1. Mauerwerkswand, daß schon kleinste Verformungen erste Veränderungen an der Wand hervorrufen, wurde bei der 2. Mauerwerkswand mit der geringsten realisierbaren Anregung (10 N) begonnen (Seite 63 und 64). Es zeigt sich, daß schon am Anfang (Kurve Seite 63 unten, Anregekraft 10 N) relativ große Dämpfungswerte erreicht werden. Ab Kurve Seite 64 unten, Anregekraft 30 N, zeigt sich schon ein unterlineares Verhalten. Bei den Kurven Seite 64 kommt es im unteren Wandbereich, eventuell nur in der ersten Mörtelfuge, zur Ausbildung feinsten Anrisse. Parallel dazu ergibt sich ein merklicher Anstieg der Dämpfung.

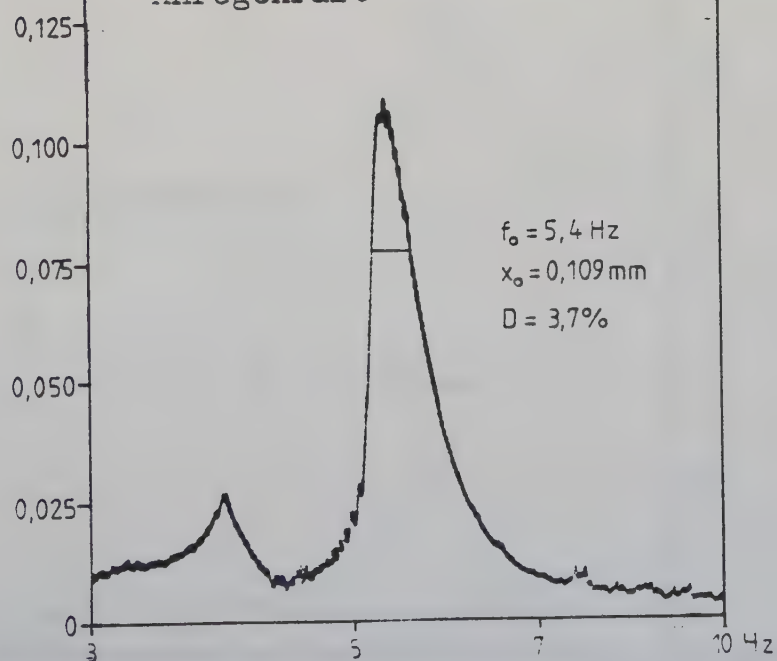
Die bei der 2. Mauerwerkswand (Kurven Seite 63 und 64) deutlich höhere Eigenfrequenz gegenüber der 1. Mauerwerkswand (Kurven Seite 56) läßt vermuten, daß bei der 1. Mauerwerkswand bereits zu Beginn der Versuche eine nicht beobachtete Rißbildung vorhanden war.

Amplitude [mm]

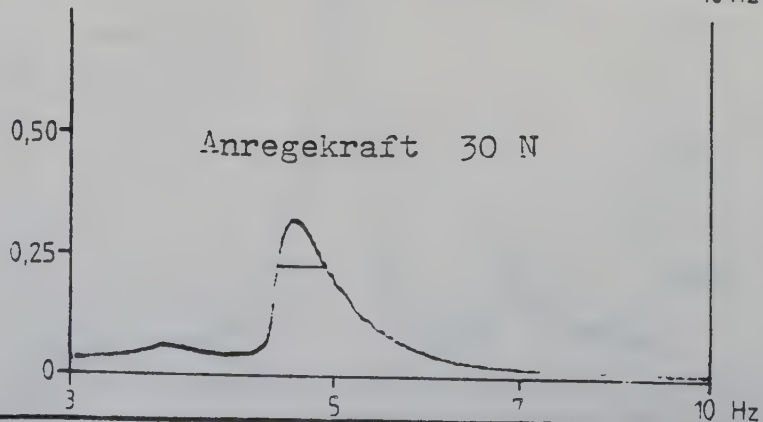
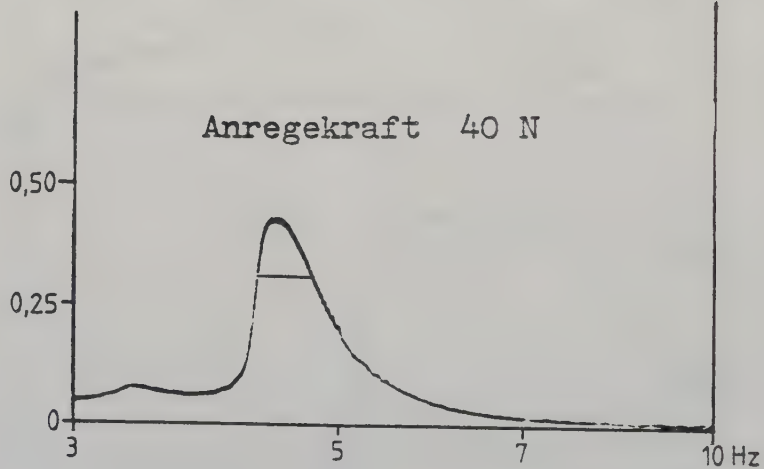
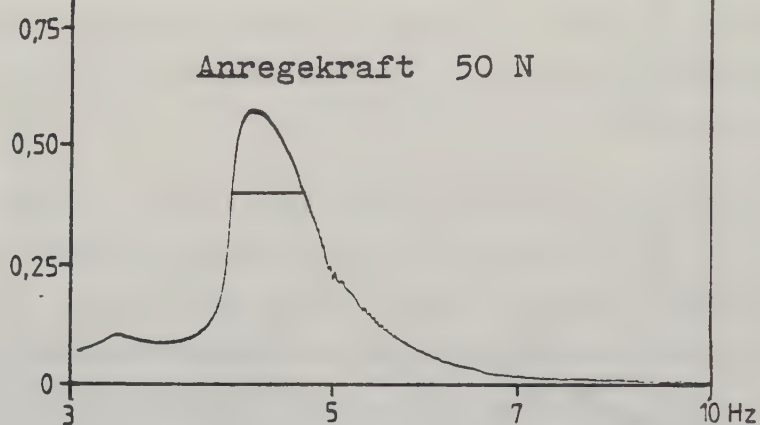
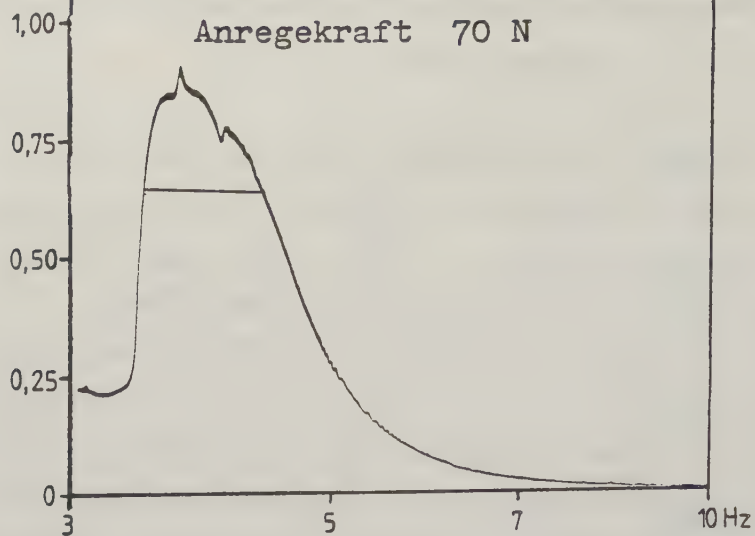
Anregekraft 20 N



Anregekraft 10 N



Amplitude [mm]



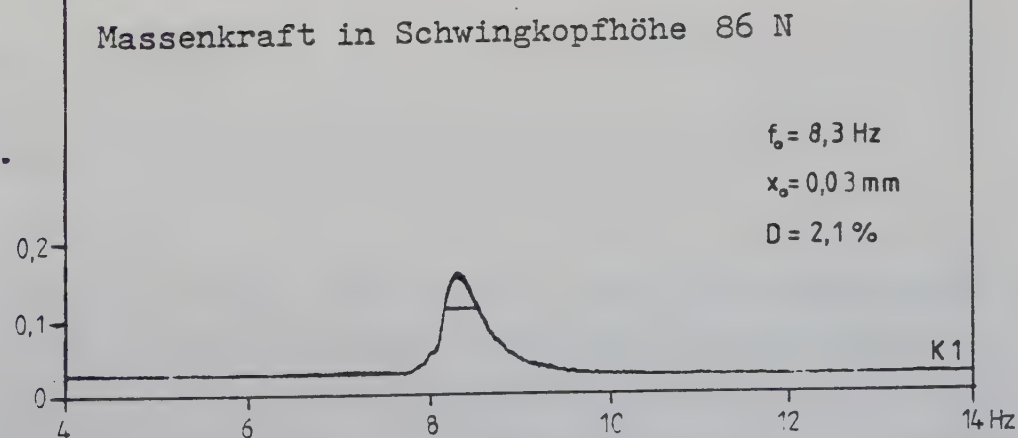
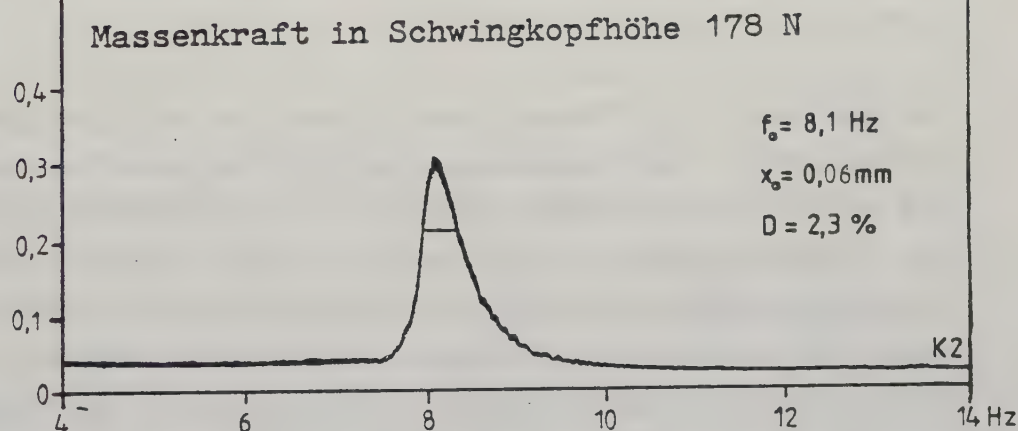
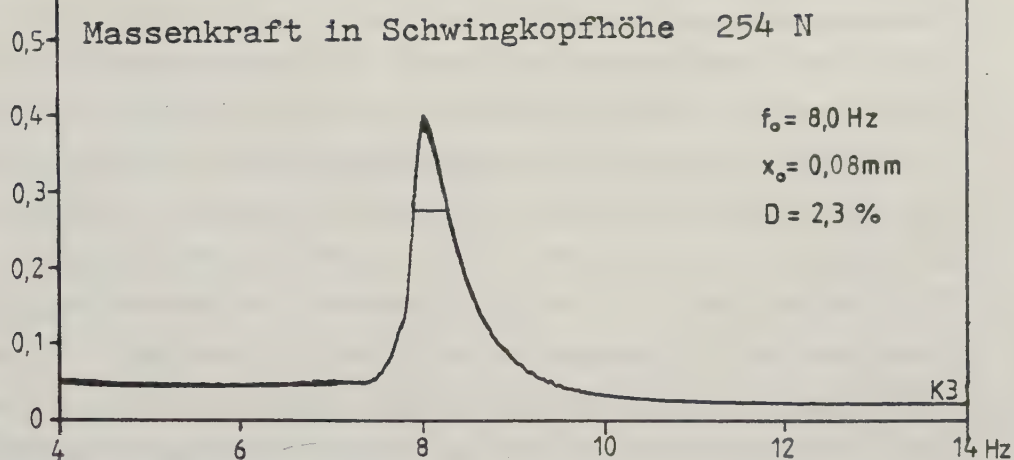
Die Versuche Seite 132 und 133, Zugversuch mit Auslenkung 1 mm bzw. 1,9 mm, wurden nach den Versuchen Seite 63/64 durchgeführt, um ein vollelastisches Materialverhalten zugrundelegen zu können. Diese snap-back Methode erwies sich aber als nicht geeignet, da beim plötzlichen Entspannen (Kappen) der Seilkraft der gefedert gelagerte Fundamentblock mitausschwingt. Der Ausschwingvorgang ist von der Fundamentalschwingung überlagert und daher nicht mehr sinnvoll auswertbar.

Nach 1 mm Auslenkung der Mauerkrone (Seite 132) wurde versucht, den Ausschwingvorgang mit 2 mm Auslenkung zu wiederholen. Bei 1,9 mm brach die untere erste Mörtelfuge deutlich hör- und sichtbar (Seite 133).

Einen sehr gut auswertbaren Ausschwingvorgang erhält man, wenn die Wand durch Anregung von Hand im Takte der Eigenfrequenz angeregt wird und dann zum Ausschwingen freigegeben wird (Seite 134). Die Eigenfrequenz ist nach den Versuchen Seite 132 und 133 um 28 % auf circa 1,5 Hz abgesunken.

Die Versuche mit der 3. Mauerwerkswand werden beim Prüfaufbau Variante 1 (Seite 67) und Variante 2 (Seite 137 bis 159) mit einer vertikalen Vorspannung von 8,5 kN durchgeführt. Bei den Versuchen Seite 67 und 137 bis 144 wurde eine neue Anregevariante angewandt. Über die mit einer zusätzlichen Masse belegte Schwingspule des Erregers ( $m$  = Gewicht der Schwingspule und Zusatzgewicht) und der Schwingspulenbeschleunigung ( $b$ ) kann eine Kraft ( $m \times b$ ) auf das Fundament wirken, die dieses so in Schwingung versetzt, daß die Wand in einen gut meßbaren Resonanzzustand gebracht werden kann. Wegen der besseren Auflösung bei kleinen Amplituden wird aus meßtechnischen Gründen die Antwort der Mauer geschwindigkeitsproportional aufgezeichnet. Parallel durchgeführte wegproportionale Aufzeichnungen ergaben keine meßbaren Unterschiede. Die Auswertung der Kurven K1 bis K3 Seite 67 ergibt im Vergleich zu den entsprechenden Versuchen Seite 63 und 64 (2. Mauerwerkswand 1. Versuch) nur circa 1,0 bis 1,5 % geringere Dämpfungswerte. Diese Erscheinung ist nicht mit dem etwas niedrigen Amplitudenniveau erklärbar. Entscheidend ist, daß bei diesem Beanspruchungsniveau bei der vertikalen Vorspannung von 8,5 kN die Entstehung kleinster Rißstrukturen in den unteren Mörtelfugen, noch unterdrückt wird.

Geschwindigkeit [cm/s]



Die Versuche Seite 137 - 140 sind Ausschwingversuche nach Fundamentanregung. Nach dem Anregen der Mauerwerkswand über den Fundamentblock durch die Massenkraft der Schwingspule und des Zusatzgewichtes wird bei eingestellter Wandresonanz der Schwingungserreger abgeschaltet und der Ausschwingvorgang der Mauerwerkswand aufgezeichnet. Es zeigt sich, daß bei allen Ausschwingvorgängen in gleicher Weise und in gleichbleibender Größenordnung die Dämpfung mit abnehmender Amplitude ansteigt. Diese Erscheinung ist mit den Versuchen Seite 52/53 vergleichbar und charakteristisch für schwingungsabhängiges Dämpfungsverhalten. Dieses Ergebnis ist typisch für ausgeprägte Rißstrukturen. Bei Ausschwingvorgängen ist davon immer auszugehen, wenn bei örtlichen Verformungen die Elastizitätsgrenze überschritten wurde.

Die Kurven K4 bis K8 auf den Seiten 142 bis 144 sind Resonanzkurven aus Fundamentanregung. Die aus den Kurven K4 bis K8 ermittelten Dämpfungen sind eine Bestätigung für die Versuche Seite 63 Kurven K1 bis K3. Bei den mit der Fußpunktanregung erreichbaren relativ kleinen Amplituden tritt nur ein schwach unterlineares Verhalten der Mauerwerksstruktur auf. Aus dem leichten Versatz im Gipfelbereich bei Kurve K8 Seite 144 läßt sich aber schon ein erstes Nachgeben der Mauerwerkswand erkennen, das heißt, es sind plastische irreversible Verformungen eingetreten.

In den Versuchen 1 bis 3 mit der 3. Mauerwerkswand waren die Wandbeanspruchungen so gering, daß Schäden an der Wand nicht aufgetreten sind. Rechnet man bei den Versuchen 1 bis 3 mit der 3. Mauerwerkswand die Masse  $m$  mit der Formel

$$m = \frac{F}{2 \cdot D \cdot \ddot{x}} \quad (18)$$

mit  $F$  = Erregerkraft

$D$  = Dämpfung

$\ddot{x}$  = Beschleunigung

aus, so zeigt sich, daß mit steigender Erregerkraft  $F$  die Masse  $m$  scheinbar kleiner wird. Um dieses Phänomen zu untersuchen, wird nun ab Kurve K9 Seite 70 mit sehr kleinen Erregerkräften in kleinen Versuchsschritten begonnen. Diese Vorgehensweise soll gewährleisten, daß bis zum Beginn der beanspruchungsbedingten Frequenzdrift beim Durchfahren der Resonanzkurven eindeutige Rückschlüsse möglich werden. In den Kurven K9 bis K13 (Seite 70 und 147) wachsen die Werte für  $D$  entsprechend dem Beanspruchungsniveau. Ein größerer Sprung in den aus den Kurven ermittelten Dämpfungswerten  $D$  ist erst bei Kurve K14 Seite 148 festzustellen, obwohl die geometrische Form der Kurve auf keine wesentlichen Änderungen der Wandstruktur schließen läßt.

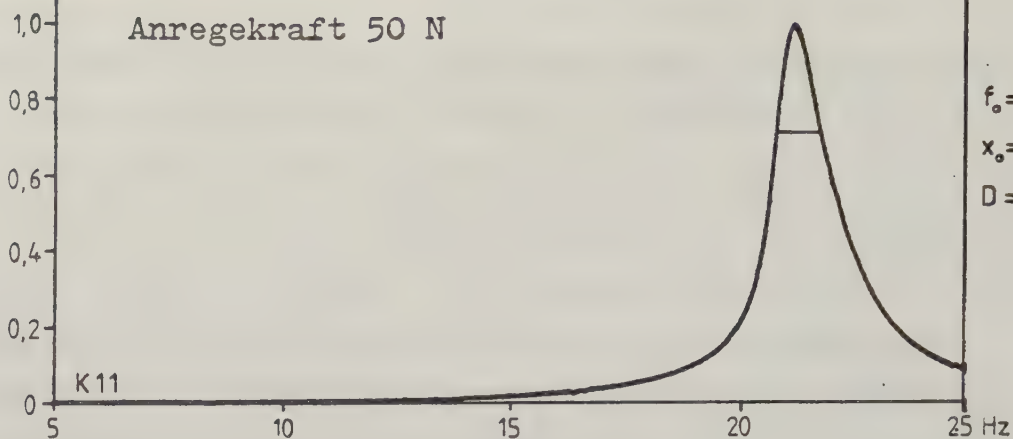
Errechnet man die Werte für  $m$  nach Gleichung (18) bei den Kurven K13 und K14, so zeigt sich auch hier, daß mit steigender Erregerkraft  $F$  die Masse  $m$  scheinbar kleiner wird.

Eine Korrektur dieses physikalisch unsinnigen Ergebnisses ergibt sich mit der Einführung eines Korrekturfaktors  $m'$  mit

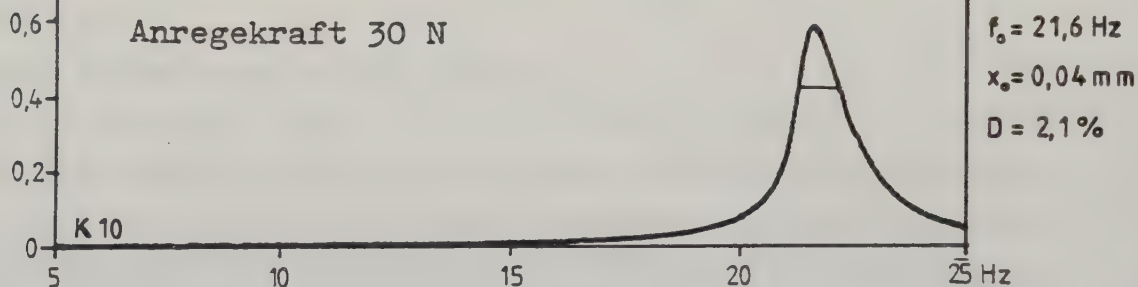
$$m' = m \left( \frac{f_1}{f_n} \right)^2 \quad (19)$$

Geschwindigkeit [cm/s]

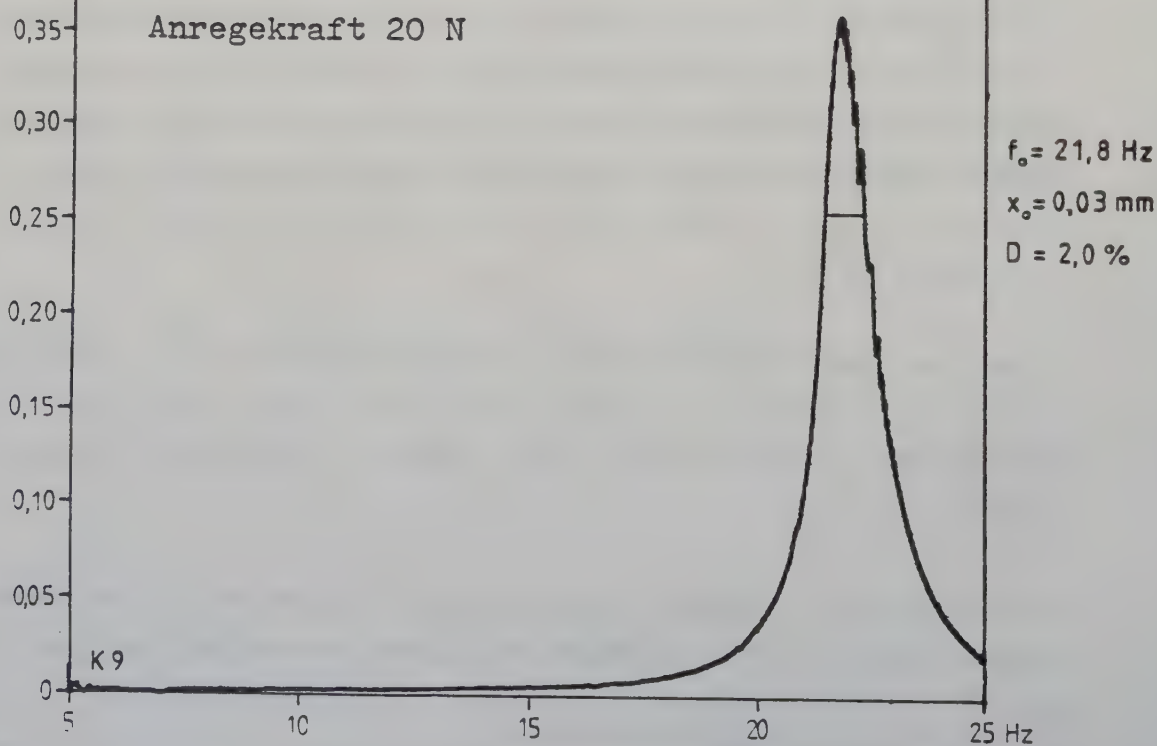
Anregekraft 50 N



Anregekraft 30 N



Anregekraft 20 N



Mittelt man die Werte für  $F = 100 \text{ N}$  auf den Seiten 123 und 129 mit der Formel

$$m'' = \frac{m'_1 + \dots + m'_n}{n} \quad (20)$$

ergibt sich eine Konstante

$$K = \frac{f_1^2 \cdot 100}{2} \quad (21)$$

mit der die Dämpfungswerte  $D$  durch Umformen der Gleichung (18) mit

$$D = \frac{F_n \cdot K}{\ddot{x}_n \cdot f_n^2} \quad (22)$$

errechnet werden.

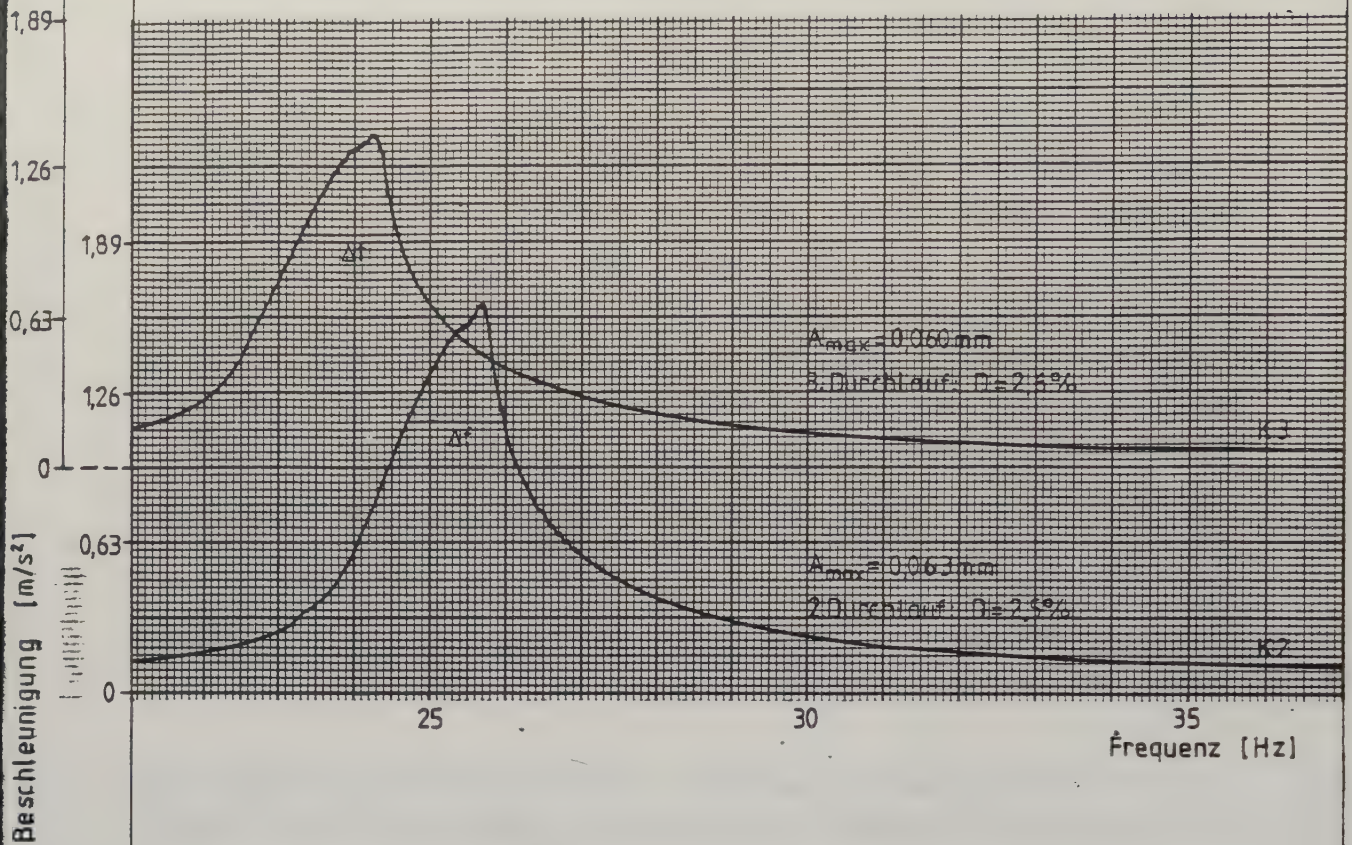
Nach den Versuchen 1 bis 4 mit der 3. Mauerwerkswand und nach Erregerkräften bis zu 2.000 N ist diese Wand vorgeschädigt, daß heißt, die Rißstrukturen sind vollständig ausgebildet. Bei den relativ geringen Erregerkräften im 5. Versuch (Kurven 24 bis 31, Seite 156 bis 159) von 30 bis 300 N ist daher keine weitere Änderung der Rißstruktur zu erwarten. Aus den Kurven 24 bis 31 ist bei der schon eingefahrenen Rißstruktur im Mittel etwa eine Verdoppelung der Dämpfung zum Beispiel Kurve K10 Seite 70 abzulesen. Für die Erregerkräfte bis 300 N sind Kurvenformen in allen Laststufen gut auswertbar. Bei den Kurven K29 bis K31 zeigt sich ein leicht unterlineares Verhalten.

Beim Prüfaufbau Variante 3 ist die Wand oben und unten starr eingespannt. Um den Ausgangszustand der 4. Mauerwerkswand zu bestimmen, wurde der 1. Versuch mit sehr kleinen Erregerkräften begonnen. Die Kurve K1 (Seite 74) zeigt ein noch sehr gutes lineares Verhalten bei relativ geringer Dämpfung von 1,5 %. Die Wandbeanspruchungen liegen dabei noch ganz im elastischen Bereich und die obere und untere Einspannung der Wand ist vollständig erhalten. Die Anregung mit 300 N Kurve K2 (Seite 74) verursachte deutlich sichtbare Risse. Diese Risse haben eine deutliche Frequenzabsenkung und eine Neigung der Kurve nach rechts (überlineares Verhalten) zur Folge. Die Dämpfung ist dabei auf 2,5 % angestiegen. Ein zweiter Durchlauf mit der gleichen Anregung Kurve K3 (Seite 74) erzeugt einen weiteren Frequenzabfall, aber nur noch eine geringe Erhöhung der Dämpfung auf 2,6 %.

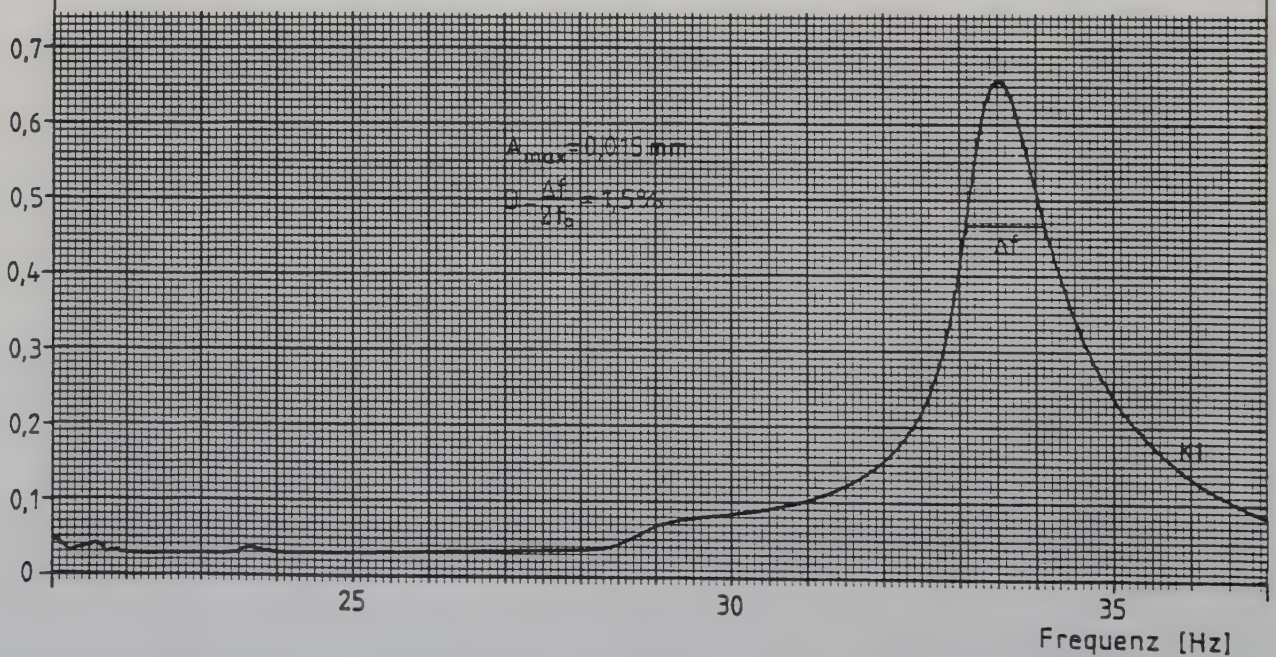
Die Schwingungsamplitude beim Ausschwingversuch Seite 76 zu Beginn des Ausschwingvorganges entspricht einer Anregekraft mit angekoppeltem Erreger von ungefähr 50 N. Die Resonanzfrequenz der Wand ist jedoch gegenüber der Kurve K26 Seite 170 von 10,3 Hz auf 7,2 Hz abgesunken. Dies zeigt, daß sich die Mauerwerkswand nach mehreren Versuchen regelrecht "freischwingt", das heißt, die Rißzonen wirken bei dann wieder reduzierten Auslenkungen wie Gelenke, da die gerissenen Fugen aufgeweitet werden.

K2 und K3:

Massenkraft in Schwingkopfhöhe 300 N



Massenkraft in Schwingkopfhöhe 75 N



Bei den Ausschwingungsversuchen Seite 172 wird die Schwingbewegung der Fundamentmasse und der gekoppelten Wand in Relation gezeigt. Über die mit einem Zusatzgewicht beschwerte Schwingspule wird das Gesamtsystem über das Fundament zunächst in einen stationären Schwingungszustand versetzt. Die Schwingfrequenz der anregenden Schwingspule ist auf die Resonanzfrequenz der Wand eingestellt. Im stationären Schwingzustand ist eine gering von  $180^\circ$  Gegenphasigkeit abweichende Bewegung von Fundament und Mauer vorhanden. Diese Gegenphasigkeit ergibt sich aus dem Phasenunterschied von Schwingkopfbewegung und Fundamentbewegung bzw. durch den resultierenden Einfluß, den die anregenden Komponenten Mauer und Schwingspule auf die Schwingbewegung des Gesamtgebildes hervorbringen. Ab dem Zeitpunkt, zu dem die Schwingspulenkraft abgeschaltet wurde, klingt die Schwingung von Mauer und Fundament exakt in Gegenphase in den Ruhestand aus.

Der Ausschwingversuch Seite 173 zeigt den Phasenunterschied zwischen Schwingspulenbewegung und Wandbewegung und die nur sehr kurze Ausschwingphase der Schwingspule nach dem Abschalten der Spulenanregung.

Bei den Ausschwingversuchen Seite 177 bis 180 ergibt sich eine deutlich höhere Dämpfung als bei den vergleichbaren Versuchen mit der 11,5 cm Mauerwerkswand. Diese höheren Dämpfungswerte resultieren offenbar aus der ineinandergreifenden Fugenstruktur, wodurch sich eine abgestufte, verästelte Rißstruktur bildet, in der es zu größeren Reibeffekten kommt.

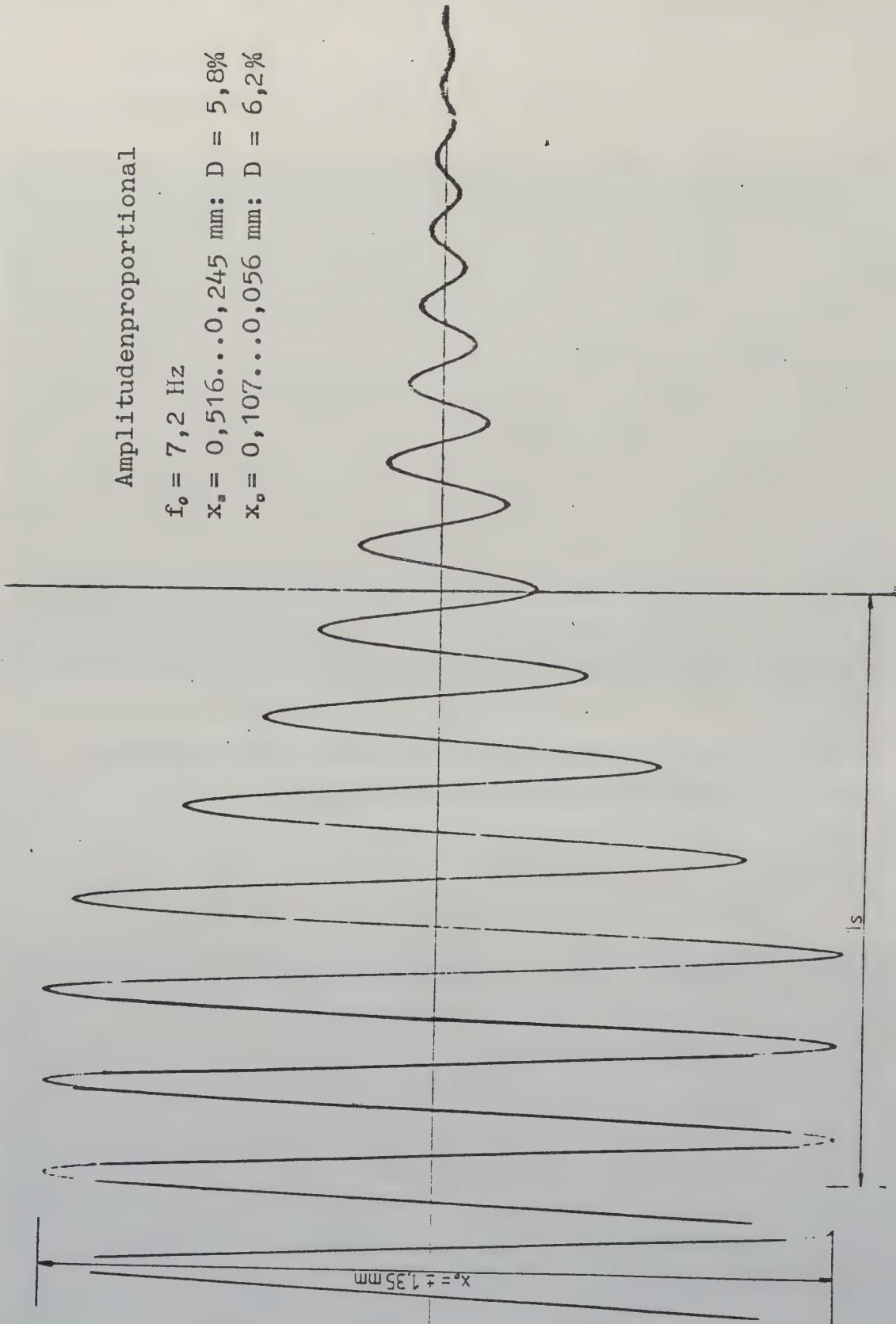
Meßpunkt: Mauermatte

Amplitudenproportional

$$f_0 = 7,2 \text{ Hz}$$

$$x_a = 0,516 \dots 0,245 \text{ mm}; D = 5,8\%$$

$$x_o = 0,107 \dots 0,056 \text{ mm}; D = 6,2\%$$



Zur Kontrolle der Auswertemethoden mit dem Triplexstab sind bei den Kurven K1 bis K7 Seite 78 bis 80 die Ausschwingkurven des Triplexstabes und die jeweils zugehörigen Fundamentalschwingungen aufgezeichnet. Die Resonanzkurven wurden durch Anregung über den Fundamentblock erzeugt. Der Wendepunkt in der Fundamentalschwingung resultiert aus der Rückwirkung des Triplexstabes auf das Fundament. Aus den beiden Amplituden  $X_F$  = Fundamentamplitude und  $X_S$  = Triplexstabamplitude ergibt sich die Resonanzüberhöhung zu

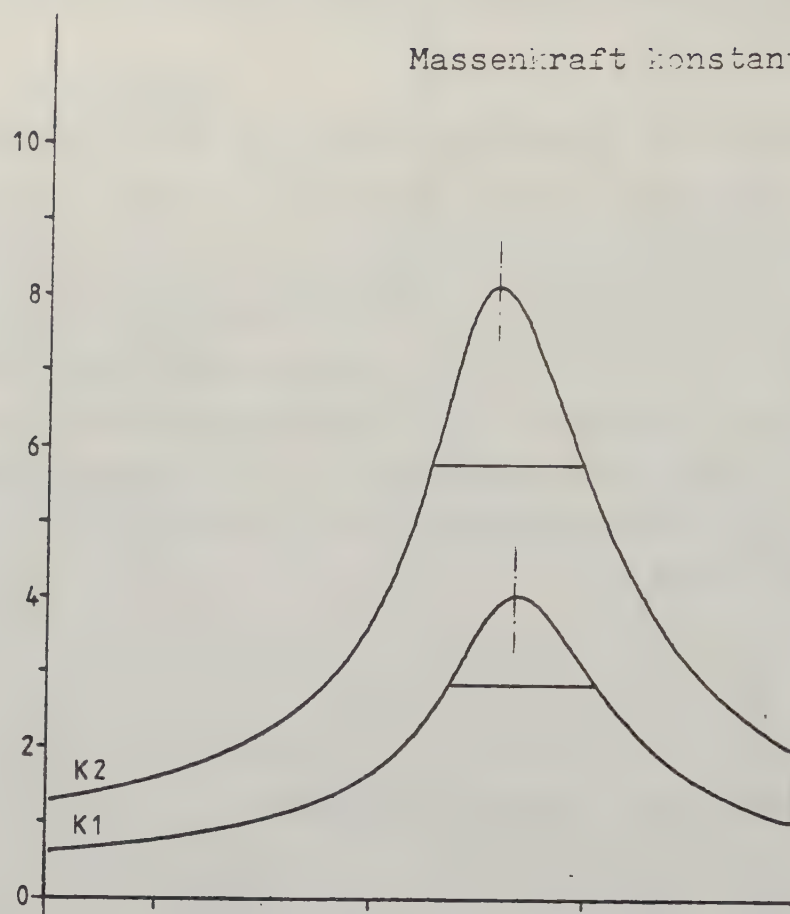
$$Q = \frac{X_S}{X_F} \quad (23)$$

Daraus ergibt sich die Dämpfung zu

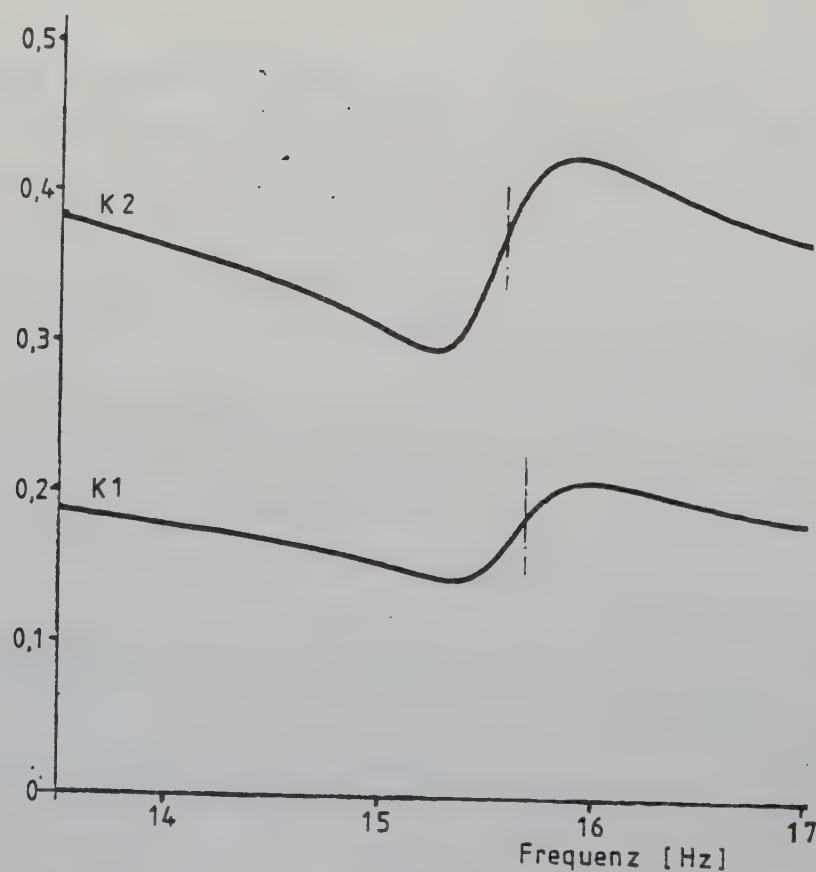
$$D = \frac{1}{2Q} = \frac{X_F}{2X_S} \quad (24)$$

Mit dieser sehr einfachen Auswertemethode ergibt sich ein relativ langsames Ansteigen der Dämpfungswerte mit zunehmender Schwingungsamplitude.

Geschwindigkeit [cm/s]



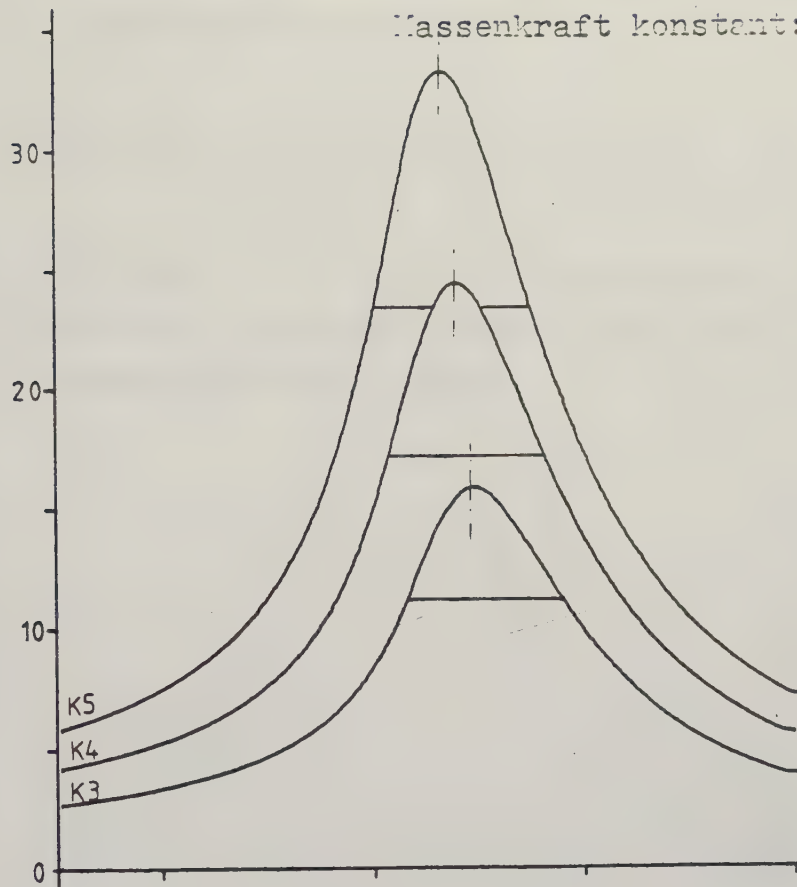
Stabschwingung



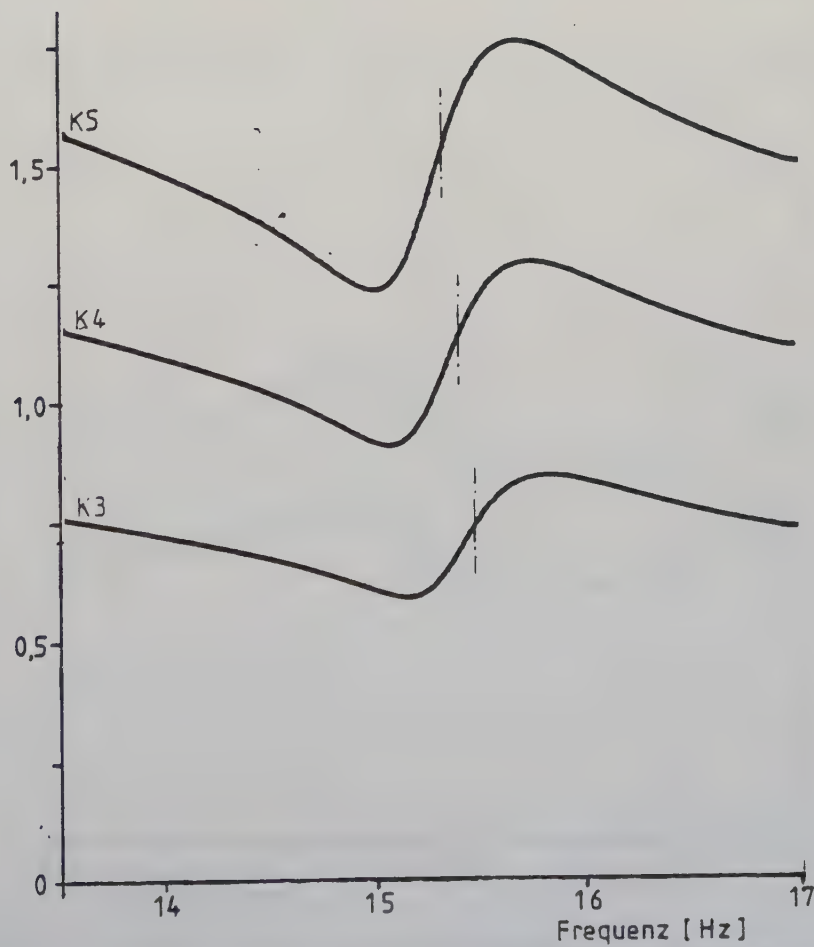
Fundamentalschwingung

Frequenz [Hz]

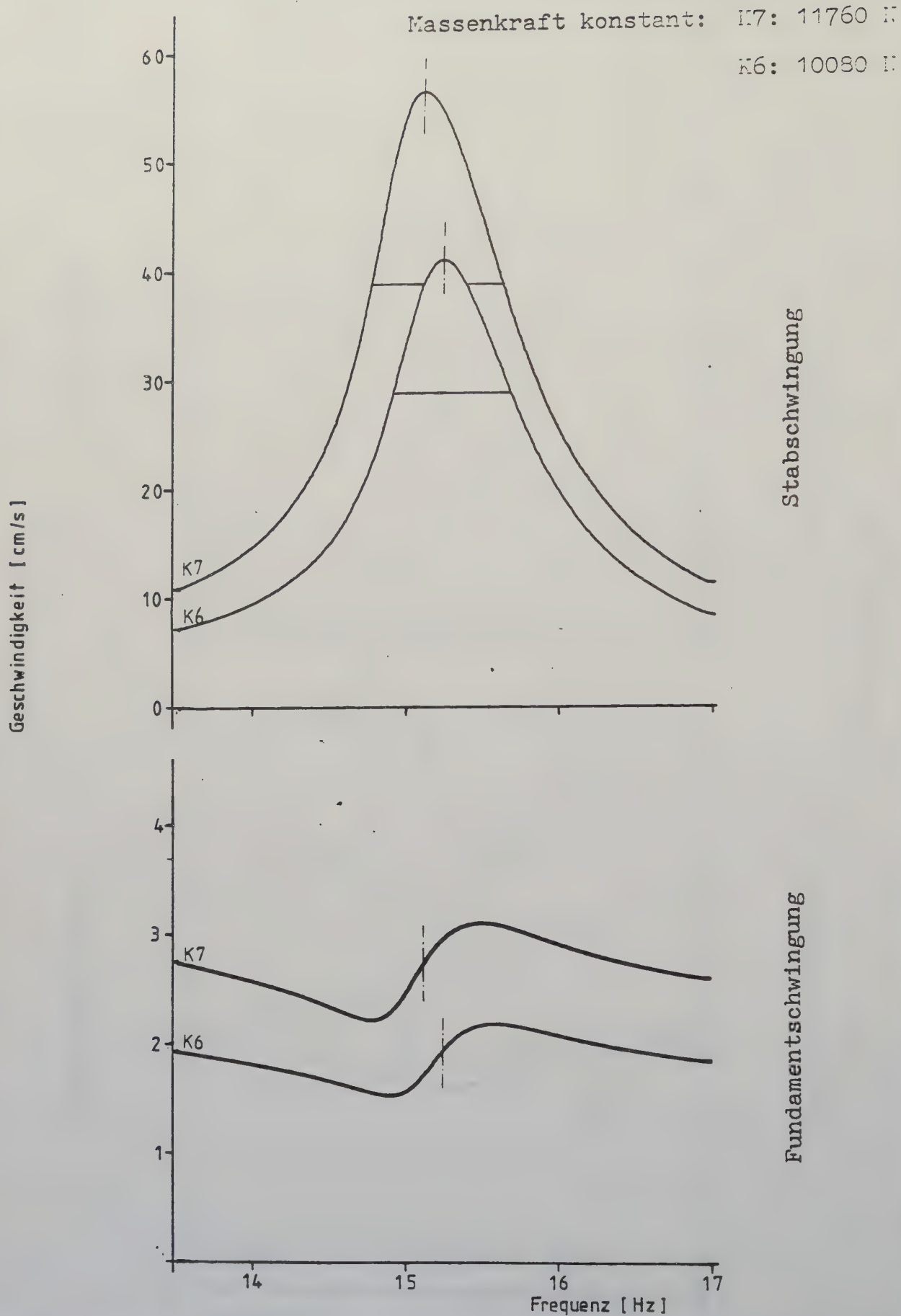
Geschwindigkeit [cm/s]



Stabschwingung

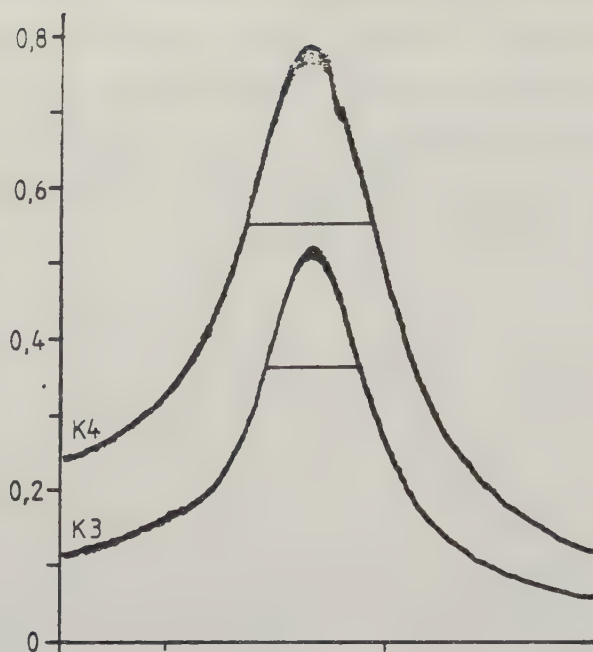


Fundamentalschwingung



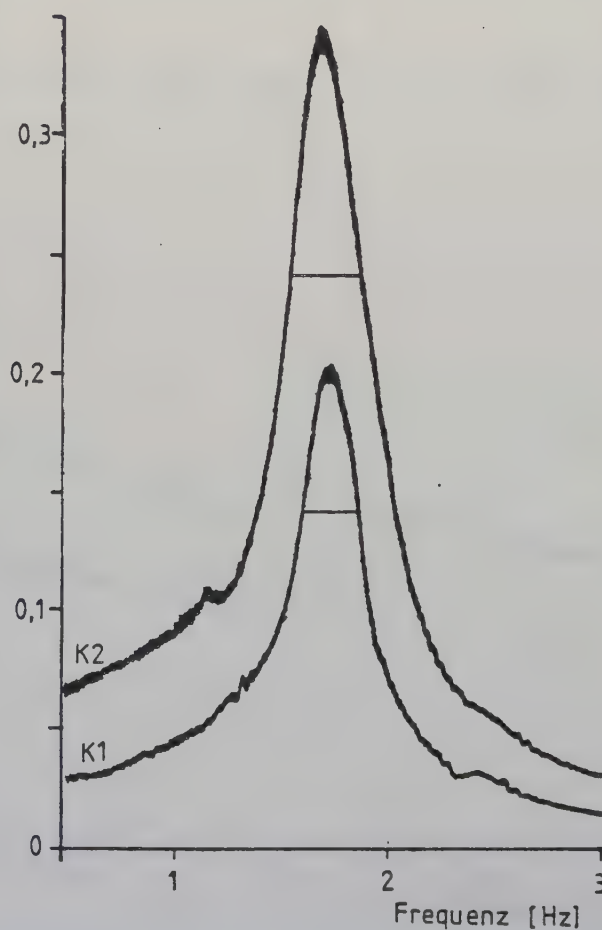
Die Resonanzkurven des Fundamentblockes (Seite 82) liegen zwischen 1,73 Hz und 1,64 Hz. Damit liegt die Resonanzfrequenz des Luftfedersystems ausreichend weit unterhalb des für die Untersuchungen der Mauerwerkswände relevanten Frequenzbereiches. Der Fundamentblock kann somit als seismische Masse betrachtet werden.

Geschwindigkeit [cm/s]



K4:  $f_0 = 1,64 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,757 \text{ mm}$   
 $D = 18,2 \%$

K3:  $f_0 = 1,66 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,494 \text{ mm}$   
 $D = 13,5 \%$



K2:  $f_0 = 1,70 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,317 \text{ mm}$   
 $D = 10,0 \%$

K1:  $f_0 = 1,73 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,181 \text{ mm}$   
 $D = 7,8 \%$

Frequenz [Hz]

## 6.2 Tabellarische Zusammenstellung

|                 | Seite |
|-----------------|-------|
| Mauerwerkswände | 84    |
| Betonwand       | 93    |
| Triplexstab     | 96    |

| Anrege-<br>kraft<br>(N)                                                                        | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermatte<br>Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) |  | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------------------------|--|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1.Vers.), Wertetabelle, Anregung von Hand, Prüfaufbau Variante 1 |                 |                  |                                                     |  |                           |                   |                                 |                                 |
|                                                                                                | 2,4             | 1,8              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 13,0                            |
|                                                                                                | 3,2             | 1,8              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 5,8                             |
|                                                                                                | 2,6             | 3,4              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 13,7                            |
|                                                                                                | 2,6             | 3,4              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 2,9                             |
|                                                                                                | 2,4             | 2,8              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 13,8                            |
|                                                                                                | 3,0             | 2,8              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 3,6                             |
|                                                                                                | 2,8             | 3,8              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 14,1                            |
|                                                                                                | 2,5             | 3,8              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 3,3                             |
|                                                                                                | 2,6             | 4,2              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 14,0                            |
|                                                                                                | 2,5             | 4,2              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 3,0                             |
|                                                                                                | 2,7             | 4,4              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 13,4                            |
|                                                                                                | 2,3             | 4,4              |                                                     |  |                           |                   |                                 | 2,9                             |

| Anrege-<br>kraft<br>(N)                                                                                             | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittel                           |  | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>Z<br>(NS/m) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|--|---------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------|
|                                                                                                                     |                 |                  | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) |  |                           |                   |                                 |                         |
| 1. Kalksandsteinwand 11,5 cm (2. Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger.<br>Prüfaufbau Variante 2 |                 |                  |                                       |  |                           |                   |                                 |                         |
| 100                                                                                                                 | 5,0             | 19,7             | 10,42                                 |  | 8,42                      | 0,68              | 0,42                            | 1188                    |
| 200                                                                                                                 | -               | 19,1             | 19,30                                 |  | 16,08                     | 1,34              | 0,66                            | 1244                    |
| 300                                                                                                                 | -               | 11,4             | 12,06                                 |  | 16,83                     | 2,35              | 1,32                            | 1786                    |
| 400                                                                                                                 | -               | 10,4             | 12,30                                 |  | 18,82                     | 2,88              | 1,81                            | 2125                    |
| 600                                                                                                                 | -               | 8,8              | 15,29                                 |  | 27,65                     | 5,00              | 3,07                            | 2170                    |
| 1000                                                                                                                | -               | 6,2              | 12,44                                 |  | 31,94                     | 8,20              | 5,48                            | 3131                    |
| 1500                                                                                                                | -               | 5,2              | 13,45                                 |  | 41,17                     | 12,60             | 8,57                            | 3643                    |
| 2000                                                                                                                | -               | 6,5              | 25,35                                 |  | 62,08                     | 15,20             | 10,16                           | 3222                    |

| Anrege-<br>kraft<br>(N)                                                                                             | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermitte                            |  | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|--|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                                                                                                     |                 |                  | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) |  |                           |                   |                                 |                                 |
| 2. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1. Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger,<br>Prüfaufbau Variante 1 |                 |                  |                                       |  |                           |                   |                                 |                                 |
| 10                                                                                                                  | 3,7             | 5,4              | 0,125                                 |  | 0,370                     | 0,109             | 0,053                           | 0,245                           |
| 20                                                                                                                  | 4,8             | 5,2              | 0,218                                 |  | 0,666                     | 0,204             | 0,098                           | 0,440                           |
| 30                                                                                                                  | 5,3             | 4,7              | 0,283                                 |  | 0,957                     | 0,324             | 0,168                           | 0,711                           |
| 40                                                                                                                  | 5,6             | 4,5              | 0,341                                 |  | 1,207                     | 0,427             | 0,230                           | 0,932                           |
| 50                                                                                                                  | 7,0             | 4,3              | 0,415                                 |  | 1,537                     | 0,569             | 0,307                           | 1,256                           |
| 70                                                                                                                  | 10,8            | 3,7              | 0,487                                 |  | 2,095                     | 0,901             | 0,490                           | 1,912                           |
| 3. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1. Vers.), Wertetabelle, Anregung über Fundamentblock, Prüfaufbau<br>Variante 1       |                 |                  |                                       |  |                           |                   |                                 |                                 |
| 86                                                                                                                  | 2,1             | 8,3              | 0,082                                 |  | 0,156                     | 0,03              | -                               | 0,07                            |
| 178                                                                                                                 | 2,3             | 8,1              | 0,155                                 |  | 0,305                     | 0,06              | -                               | 0,14                            |
| 254                                                                                                                 | 2,3             | 8,0              | 0,202                                 |  | 0,402                     | 0,08              | -                               | 0,36                            |

| Anregungs-<br>kraft<br>(N)                                                                                         | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittel<br>Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) |  | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------------------------------------------|--|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 3. Kalksandsteinwand 11,5 cm (4. Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger<br>Prüfaufbau Variante 2 |                 |                  |                                                      |  |                           |                   |                                 |                                 |
| 20                                                                                                                 | 2,0             | 21,8             | 0,563                                                |  | 0,411                     | 0,03              | 0,02                            | 0,04                            |
| 30                                                                                                                 | 2,1             | 21,6             | 0,737                                                |  | 0,543                     | 0,04              | 0,03                            | 0,06                            |
| 50                                                                                                                 | 2,4             | 21,2             | 1,242                                                |  | 0,932                     | 0,07              | 0,05                            | 0,10                            |
| 70                                                                                                                 | 2,4             | 21,1             | 1,933                                                |  | 1,458                     | 0,11              | 0,08                            | 0,15                            |
| 100                                                                                                                | 2,6             | 20,7             | 2,707                                                |  | 2,081                     | 0,16              | 0,11                            | 0,22                            |
| 150                                                                                                                | 2,3             | 18,7             | 4,280                                                |  | 3,642                     | 0,31              | 0,20                            | 0,33                            |
| 200                                                                                                                | 1,9             | 17,9             | 6,198                                                |  | 5,511                     | 0,49              | 0,34                            | 0,51                            |
| 300                                                                                                                | 2,8             | 16,6             | 7,724                                                |  | 7,405                     | 0,71              | 0,51                            | 0,65                            |
| 400                                                                                                                | 2,3             | 13,3             | 11,313                                               |  | 13,538                    | 1,62              | 1,14                            | 1,11                            |
| 500                                                                                                                | 3,2             | 12,5             | 12,090                                               |  | 15,394                    | 1,96              | 1,35                            | 1,15                            |
| 600                                                                                                                | 4,3             | 12,0             | 12,507                                               |  | 16,588                    | 2,20              | 1,50                            | 1,24                            |
| 750                                                                                                                | 6,2             | 10,8             | 13,031                                               |  | 19,204                    | 2,83              | 1,94                            | 1,42                            |
| 1000                                                                                                               | 9,2             | 10,3             | 14,240                                               |  | 22,004                    | 3,40              | 2,40                            | 1,55                            |
| 1500                                                                                                               | 10,4            | 9,2              | 20,049                                               |  | 34,683                    | 6,00              | 3,40                            | 2,54                            |
| 2000                                                                                                               | 13,4            | 5,1              | 20,126                                               |  | 62,807                    | 19,60             | 12,80                           | 6,20                            |

| Anrege-<br>kraft<br>(N)                                                                                            | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittel                           |                           | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                                                                                                    |                 |                  | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                   |                                 |                                 |
| 3. Kalksandsteinwand 11,5 cm (5. Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger<br>Prüfaufbau Variante 2 |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                                 |
| 25                                                                                                                 | 4,4             | 10,9             | 1,032                                 | 1,507                     | 0,22              | 0,14                            | 0,07                            |
| 30                                                                                                                 | 4,9             | 10,8             | 1,289                                 | 1,900                     | 0,28              | 0,19                            | 0,09                            |
| 40                                                                                                                 | 5,6             | 10,6             | 1,996                                 | 2,997                     | 0,45              | 0,30                            | 0,14                            |
| 50                                                                                                                 | 5,9             | 10,2             | 2,358                                 | 3,680                     | 0,57              | 0,36                            | 0,17                            |
| 70                                                                                                                 | 6,2             | 10,1             | 3,141                                 | 4,950                     | 0,78              | 0,48                            | 0,24                            |
| 100                                                                                                                | 7,7             | 9,7              | 3,974                                 | 6,521                     | 1,07              | 0,64                            | 0,30                            |
| 200                                                                                                                | 9,7             | 9,0              | 5,660                                 | 10,009                    | 1,77              | 0,97                            | 0,45                            |
| 300                                                                                                                | 10,4            | 8,8              | 6,971                                 | 12,607                    | 2,28              | 1,28                            | 0,61                            |
| 4. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1. Vers.), Wertetabelle, Anregung über Fundamentblock, Prüfaufbau<br>Variante 3      |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                                 |
| 75                                                                                                                 | 1,5             | 33,5             | 0,660                                 | 0,313                     | 0,015             | 0,010                           | -                               |
| 300                                                                                                                | 2,5             | 25,7             | 1,643                                 | 1,017                     | 0,063             | 0,042                           | -                               |
| 300                                                                                                                | 2,6             | 24,2             | 1,387                                 | 0,912                     | 0,060             | 0,040                           | -                               |

| Anregungs-<br>kraft<br>(N)                                                                                         | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Mauermittel<br>Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 4. Kalksandsteinwand 11,5 cm (2. Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger<br>Prüfaufbau Variante 3 |                 |                  |                                       |                                          |                   |                                 |                                 |
| 50                                                                                                                 | 4,0             | 24,2             | 1,860                                 | 1,223                                    | 0,080             | 0,051                           | 4088                            |
| 50                                                                                                                 | 3,2             | 23,5             | 2,079                                 | 1,408                                    | 0,095             | 0,060                           | 3551                            |
| 70                                                                                                                 | 3,4             | 23,5             | 2,812                                 | 1,904                                    | 0,129             | 0,076                           | 3676                            |
| 70                                                                                                                 | 6,0             | 21,6             | 2,126                                 | 1,566                                    | 0,115             | 0,071                           | 4470                            |
| 70                                                                                                                 | 5,3             | 19,1             | 2,263                                 | 1,890                                    | 0,157             | 0,097                           | 3704                            |
| 100                                                                                                                | 6,2             | 21,0             | 3,000                                 | 2,274                                    | 0,172             | 0,102                           | 4398                            |
| 100                                                                                                                | 10,5            | 19,7             | 2,300                                 | 1,853                                    | 0,150             | 0,099                           | 5382                            |
| 100                                                                                                                | 11,4            | 18,9             | 2,200                                 | 1,853                                    | 0,156             | 0,098                           | 5397                            |
| 200                                                                                                                | 11,4            | 19,9             | 4,400                                 | 3,519                                    | 0,231             | 0,152                           | 5683                            |
| 200                                                                                                                | 13,1            | 16,0             | 3,500                                 | 3,482                                    | 0,346             | 0,218                           | 5744                            |
| 200                                                                                                                | 21,6            | 15,1             | 3,200                                 | 3,373                                    | 0,355             | 0,222                           | 5929                            |
| 300                                                                                                                | 20,8            | 15,1             | 4,900                                 | 5,165                                    | 0,544             | 0,344                           | 5809                            |
| 400                                                                                                                | 26,3            | 14,7             | 5,800                                 | 6,280                                    | 0,680             | 0,405                           | 6369                            |
| 500                                                                                                                | 29,9            | 14,5             | 6,800                                 | 7,464                                    | 0,879             | 0,494                           | 6699                            |
| 500                                                                                                                | 20,6            | 13,6             | 8,200                                 | 9,569                                    | 1,123             | 0,657                           | 5211                            |

| Anrege-<br>kraft<br>(N)                                                                                            | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittelte                         |                           | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                                                                                                    |                 |                  | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                   |                                 |                                 |
| 700                                                                                                                | 9,0             | 14,1             | 17,325                                | 19,556                    | 2,207             | 1,319                           | 3579                            |
| 700                                                                                                                | 8,7             | 12,2             | 17,610                                | 23,012                    | 3,002             | 2,026                           | 3042                            |
| 4. Kalksandsteinwand 11,5 cm (3. Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger<br>Prüfaufbau Variante 3 |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                                 |
| 50                                                                                                                 | 10,8            | 11,8             | 1,043                                 | 1,470                     | 0,190             | 0,127                           | 3554                            |
| 70                                                                                                                 | 7,9             | 10,7             | 1,706                                 | 2,538                     | 0,377             | 0,248                           | 2753                            |
| 100                                                                                                                | 8,1             | 10,5             | 2,623                                 | 3,976                     | 0,603             | 0,391                           | 2515                            |
| 200                                                                                                                | 8,7             | 10,4             | 4,300                                 | 6,580                     | 1,007             | 0,662                           | 3040                            |
| 300                                                                                                                | 9,6             | 10,8             | 6,650                                 | 9,800                     | 1,444             | 0,953                           | 3061                            |
| 400                                                                                                                | 8,5             | 11,3             | 9,400                                 | 13,239                    | 1,865             | 1,260                           | 3021                            |

| Anreges-<br>kraft<br>(N)                                                                                  | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittel<br>Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) |       | Amplitude<br>(mm) | Anregekt-<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------------------------------------------|-------|-------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Kalksandsteinwand 24 cm (1.Vers.), Wertetabelle, Anregung über Fundamentblock, Prüfaufbau Variante 1      |                 |                  |                                                      |       |                   |                                |                                 |
| 103                                                                                                       | 2,4             | 18,2             | 0,326                                                | 0,285 | 0,025             | 0,015                          | 0,030                           |
| 258                                                                                                       | 3,0             | 16,8             | 0,792                                                | 0,750 | 0,071             | 0,044                          | 0,200                           |
| 515                                                                                                       | 7,0             | 14,5             | 1,302                                                | 1,430 | 0,157             | 0,094                          | 0,437                           |
| Kalksandsteinwand 24 cm (3,Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger Prüfaufbau Variante 1 |                 |                  |                                                      |       |                   |                                |                                 |
| 30                                                                                                        | 3,7             | 16,8             | 0,169                                                | 0,16  | 0,015             | 0,009                          | 0,047                           |
| 40                                                                                                        | 3,5             | 16,6             | 0,229                                                | 0,22  | 0,021             | 0,011                          | 0,063                           |
| 50                                                                                                        | 3,7             | 16,3             | 0,277                                                | 0,27  | 0,026             | 0,015                          | 0,079                           |
| 60                                                                                                        | 3,6             | 16,1             | 0,354                                                | 0,35  | 0,035             | 0,017                          | 0,095                           |
| 80                                                                                                        | 4,5             | 15,7             | 0,404                                                | 0,41  | 0,042             | 0,022                          | 0,124                           |
| 100                                                                                                       | 6,4             | 14,9             | 0,421                                                | 0,45  | 0,048             | 0,025                          | 0,131                           |

| Anreges-<br>kraft<br>(N)                                                                                      | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittelte<br>Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) |  | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregespt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|--------------------------------------------------------|--|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Kalksandsteinwand 24 cm (5. Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger<br>Prüfaufbau Variante 2 |                 |                  |                                                        |  |                           |                   |                                 |                                 |
| 100                                                                                                           | 3,5             | 23,8             | 0,986                                                  |  | 0,66                      | 0,044             | 0,030                           | 0,083                           |
| 200                                                                                                           | 10,7            | 17,8             | 1,130                                                  |  | 1,01                      | 0,090             | 0,061                           | 0,198                           |
| 400                                                                                                           | 19,3            | 14,6             | 1,679                                                  |  | 1,83                      | 0,199             | 0,128                           | 0,498                           |
| 700                                                                                                           | 31,9            | 11,8             | 2,283                                                  |  | 3,08                      | 0,415             | 0,254                           | 0,990                           |

| Messen-<br>kraft<br>Schwing-<br>kopf (N)                                                                                      | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittel                           |                           | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                                                                                                               |                 |                  | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                   |                                 |                                 |
| Betonwand (1./2.Vers.), Wertetabelle, Anregung über Fundamentblock, Anregung bei angekoppeltem Erreger, Rüfauflbau Variante 2 |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                                 |
| 310                                                                                                                           | 2,7             | 23,7             | 1,308                                 | 0,879                     | 0,059             | 0,041                           | 0,115                           |
| 930                                                                                                                           | 4,3             | 23,2             | 2,465                                 | 1,691                     | 0,116             | 0,081                           | 0,224                           |
| Anregge-<br>kraft                                                                                                             |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                                 |
| 100                                                                                                                           | 2,5             | 23,8             | 1,140                                 | 0,763                     | 0,051             | 0,035                           | 0,100                           |
| 100                                                                                                                           | 2,5             | 23,7             | 1,175                                 | 0,789                     | 0,053             | 0,036                           | 0,104                           |
| 200                                                                                                                           | 2,7             | 23,3             | 2,208                                 | 1,508                     | 0,103             | 0,073                           | 0,199                           |
| 300                                                                                                                           | 3,3             | 22,8             | 3,735                                 | 2,607                     | 0,182             | 0,129                           | 0,332                           |
| 100                                                                                                                           | 2,5             | 23,3             | 1,329                                 | 0,908                     | 0,062             | 0,044                           | 0,113                           |
| 400                                                                                                                           | 3,9             | 22,0             | 4,796                                 | 3,470                     | 0,251             | 0,182                           | 0,449                           |
| 500                                                                                                                           | 4,5             | 21,0             | 6,268                                 | 4,750                     | 0,360             | 0,265                           | 0,650                           |
| 700                                                                                                                           | 4,3             | 19,5             | 9,607                                 | 7,841                     | 0,640             | 0,477                           | 1,080                           |
| 1000                                                                                                                          | 4,4             | 18,7             | 13,667                                | 11,632                    | 0,990             | 0,740                           | 1,650                           |
| 100                                                                                                                           | 3,0             | 21,5             | 1,350                                 | 1,000                     | 0,074             | 0,053                           | 0,129                           |
| 1500                                                                                                                          | 4,2             | 17,8             | 18,137                                | 16,217                    | 1,450             | 1,094                           | 2,330                           |

| Anregungs-<br>kraft<br>(N)                                                                    | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittel<br>Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) |  | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------------------------------------------------|--|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 500                                                                                           | 2,6             | 19,3             | 6,882                                                |  | 5,675                     | 0,468             | 0,355                           | 0,765                           |
| 2000                                                                                          | 4,5             | 16,7             | 22,615                                               |  | 21,552                    | 2,054             | 1,567                           | 3,250                           |
| 3000                                                                                          | 7,7             | 15,6             | 28,390                                               |  | 28,964                    | 2,955             | 2,190                           | 4,450                           |
| 500                                                                                           | 3,6             | 17,3             | 7,385                                                |  | 6,794                     | 0,625             | 0,485                           | 0,905                           |
| Betonwand (3. Vers.), Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem Erreger, Prüfaufbau Variante 3 |                 |                  |                                                      |  |                           |                   |                                 |                                 |
| 100                                                                                           | 2,4             | 39,9             | 2,640                                                |  | 1,05                      | 0,042             | 0,033                           | 0,031                           |
| 200                                                                                           | 2,7             | 39,3             | 5,548                                                |  | 2,25                      | 0,091             | 0,071                           | 0,063                           |
| 300                                                                                           | 2,8             | 39,0             | 9,127                                                |  | 3,73                      | 0,152             | 0,110                           | 0,102                           |
| 400                                                                                           | 3,1             | 38,7             | 12,475                                               |  | 5,13                      | 0,211             | 0,156                           | 0,138                           |
| 500                                                                                           | 3,3             | 37,9             | 15,027                                               |  | 6,31                      | 0,265             | 0,196                           | 0,170                           |
| 700                                                                                           | 3,8             | 37,3             | 19,334                                               |  | 8,25                      | 0,352             | 0,284                           | 0,235                           |
| 1000                                                                                          | 3,9             | 36,5             | 29,085                                               |  | 12,68                     | 0,553             | 0,453                           | 0,339                           |
| 1500                                                                                          | 4,3             | 35,4             | 47,866                                               |  | 21,52                     | 0,968             | 0,731                           | 0,492                           |
| 2000                                                                                          | 3,2             | 34,0             | 70,509                                               |  | 33,01                     | 1,545             | 1,147                           | 0,722                           |
| 3000                                                                                          | 6,3             | 31,3             | 116,030                                              |  | 59,00                     | 3,000             | 2,259                           | 1,185                           |
| 4000                                                                                          | 8,4             | 28,6             | 133,882                                              |  | 74,50                     | 4,146             | 2,906                           | 1,323                           |
| 5000                                                                                          | 7,8             | 23,7             | 174,226                                              |  | 117,00                    | 7,857             | 5,686                           | 1,571                           |

| Massen-<br>kraft<br>Schwing-<br>kopf (N)                                                                                       | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittel                           |                           | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>Z<br>(NS/m) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------------|
|                                                                                                                                |                 |                  | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                   |                                 |                         |
| Betonwand (4./5. Vers.), Vertetabelle, Anregung über Fundamentblock, Anregung bei angekoppeltem Erreger, Prüfaufbau Variante 3 |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                         |
| 258                                                                                                                            | 2,0             | 26,4             | 2,201                                 | 1,327                     | 0,03              | -                               | -                       |
| 361                                                                                                                            | 2,4             | 26,1             | 2,958                                 | 1,304                     | 0,11              | -                               | -                       |
| 515                                                                                                                            | 2,5             | 25,7             | 3,911                                 | 2,422                     | 0,15              | -                               | -                       |
| 773                                                                                                                            | 2,6             | 25,2             | 6,017                                 | 3,800                     | 0,24              | -                               | -                       |
|                                                                                                                                |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                         |
| Anrege-<br>kraft                                                                                                               |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                         |
| 100                                                                                                                            | 2,5             | 24,4             | 7,991                                 | 5,213                     | 0,54              | -                               | 1918                    |
| 150                                                                                                                            | 2,6             | 23,8             | 12,523                                | 8,374                     | 0,56              | -                               | 1791                    |
| 200                                                                                                                            | 2,5             | 23,4             | 17,293                                | 11,762                    | 0,60              | -                               | 1700                    |

| Massen-<br>kraft<br>Schwing-<br>kopf (N)                                                                                   | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermittel                           |                           | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Konstante<br>K<br>(kg) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|------------------------|
|                                                                                                                            |                 |                  | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                   |                                 |                        |
| Eichstab, Triplex, Vertetabelle, Anregung über Fundamentblock, Anregung bei angekoppeltem Erreger<br>Prüfaufbau Variante 3 |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                        |
| 530                                                                                                                        | 2,8             | 15,2             | 2,28                                  | 2,39                      | 0,25              | -                               | -                      |
| 1150                                                                                                                       | 2,8             | 15,1             | 4,59                                  | 4,84                      | 0,51              | -                               | -                      |
| 1730                                                                                                                       | 2,9             | 15,1             | 6,66                                  | 7,02                      | 0,74              | -                               | -                      |
| 2300                                                                                                                       | 3,0             | 15,0             | 8,79                                  | 9,33                      | 0,99              | -                               | -                      |
| 2880                                                                                                                       | 3,0             | 15,0             | 11,19                                 | 11,88                     | 1,26              | -                               | -                      |
| Anrege-<br>kraft                                                                                                           |                 |                  |                                       |                           |                   |                                 |                        |
| 8,5                                                                                                                        | 2,8             | 15,2             | 2,28                                  | 2,39                      | 0,25              | 355,6                           | 133,1                  |
| 17,0                                                                                                                       | 2,9             | 15,1             | 4,41                                  | 4,65                      | 0,49              | 365,6                           | 132,9                  |
| 25,5                                                                                                                       | 2,9             | 15,1             | 6,66                                  | 7,02                      | 0,74              | 363,2                           | 132,0                  |
| 34,0                                                                                                                       | 3,0             | 15,0             | 8,79                                  | 9,33                      | 0,99              | 364,4                           | 128,9                  |
| 42,5                                                                                                                       | 3,1             | 15,0             | 10,93                                 | 11,59                     | 1,23              | 366,7                           | 125,4                  |

| Anregungs-<br>kraft<br>(N)                                                                                       | Frequenz<br>(Hz) | Dämpfung<br>Kurve ( f )<br>(%) | $\dot{x}$<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Stabmitte<br>$\dot{x}$<br>(cm/s) | $x$<br>(mm) | Fundament<br>$\dot{x}$<br>(cm/s) | Konstante<br>$K$<br>(kg) | Dämpfung<br>aus $K_{1/2}$<br>(%) |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| Eichstab-Dämpfung Halbwertsbreite/Gewichtskonstante, Anregung bei angekoppeltem Erreger<br>Prüfaufbau Variante 5 |                  |                                |                                  |                                  |             |                                  |                          |                                  |
| 20                                                                                                               | 15,02            | 2,44                           | 5,65                             | 5,99                             | 0,635       | 0,075                            | 226,2                    | 2,44                             |
| 40                                                                                                               | 14,89            | 2,68                           | 10,76                            | 11,50                            | 1,230       | 0,143                            | 227,1                    | 2,68                             |
| 60                                                                                                               | 14,79            | 2,75                           | 16,04                            | 17,26                            | 1,858       | 0,219                            | 225,6                    | 2,72                             |
| 80                                                                                                               | 14,71            | 2,79                           | 21,00                            | 22,72                            | 2,459       | 0,294                            | 228,1                    | 2,82                             |
| 100                                                                                                              | 14,61            | 2,81                           | 26,18                            | 28,52                            | 3,108       | 0,358                            | 227,9                    | 2,84                             |
| 120                                                                                                              | 14,55            | 2,89                           | 31,15                            | 34,07                            | 3,729       | 0,432                            | 226,6                    | 2,88                             |
| 160                                                                                                              | 14,46            | 2,99                           | 40,62                            | 44,71                            | 4,924       | 0,578                            | 227,8                    | 3,01                             |
| 200                                                                                                              | 14,41            | 3,00                           | 50,60                            | 55,89                            | 6,176       | 0,730                            | 228,2                    | 3,04                             |
| 250                                                                                                              | 14,36            | 2,96                           | 64,15                            | 71,10                            | 7,884       | 0,938                            | 226,5                    | 2,95                             |
| 300                                                                                                              | 14,34            | 2,87                           | 77,77                            | 86,31                            | 9,584       | 1,148                            | 227,7                    | 2,89                             |

## 7. Wertung der Versuchsergebnisse

### - Fundamentbewegung

Der elektrodynamische Schwingerreger und die Prüfkörper sind mit dem luftfedergelagerten Stahlbetonfundament durch Hammerkopfschrauben fest verbunden (Abbildung 9, Seite 36). Die gemessene Eigenfrequenz der Fundamentluftfederung (Kapitel 8.3 Seite 224 Fundamentresonanz durch Luftfedersystem, Anregung am Gestell) liegt mit ungefähr 1,7 Hz um ein mehrfaches unterhalb des Bereiches, in dem die niedrigsten Prüfkörpereigenfrequenzen gemessen wurden. Das Stahlbetonfundament kann somit bei der Betrachtung des Einflusses der Fundamentbewegung auf die Meßwertgrößen als "seismischer Block", die Prüfkörper als daran angekoppelte Eigenmassenschwinger angesehen werden (Abbildung 17).

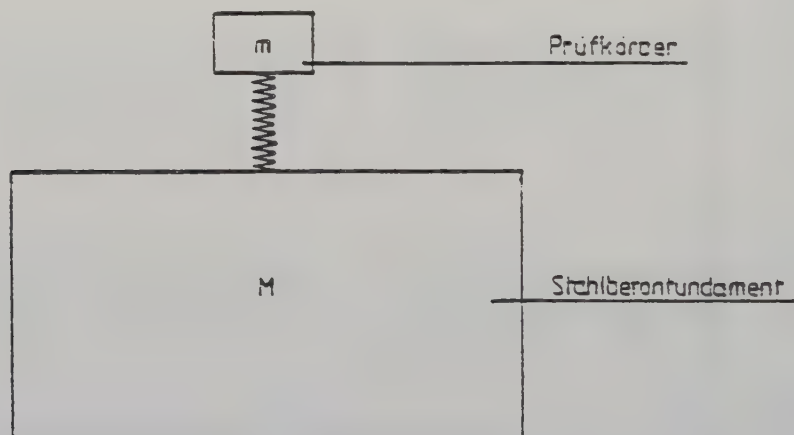


Abbildung 17 "seismischer Block"

Seismische Masse (M):

Fundament, Schwingerreger, Prüfaufbau

M = 15000 kg

Prüfkörpermasse (m):

Mauerwerkswand 11,5 cm

m = 460 kg

Mauerwerkswand 24 cm

m = 960 kg

Stahlbetonwand 11,5 cm

m = 550 kg

Triplexstab

m = 118 kg

Im Resonanzfall schwingen die beiden Massen M und m um einen gemeinsamen, ruhenden Punkt. Die wirksame Federsteifigkeit c ist im Verhältnis (M+m)/M versteift. Damit ergibt sich die Resonanzfrequenz  $f_0$  des Systems zu:

$$\begin{aligned} f_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c (M + m)}{m \cdot M}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m} \left(1 + \frac{m}{M}\right)} \end{aligned}$$

(25)

Aus Gleichung (25) ergibt sich, daß die gemessenen Eigenfrequenzen um den Faktor  $\sqrt{1 + \frac{m}{M}}$  zu groß sind. Damit ergeben sich bei den einzelnen Prüfkörpern die folgenden Fehler bei den gemessenen Eigenfrequenzen.

Mauerwerkswand 11,5 cm

+1,5 %

Mauerwerkswand 24 cm

+3,1 %

Stahlbetonwand 11,5 cm

+1,8 %

Triplexstab

+0,4 %

Die Überhöhung der Schwingungsamplitude des Prüfkörpers im Resonanzpunkt wird ebenfalls durch das Massenverhältnis zwischen Prüfkörper und "seismischem Block" beeinflusst. Die Überhöhung ist um den Faktor

$$k_1 = \frac{\sqrt{1 + \frac{m}{M}}}{1 + \frac{m}{M}} \quad (26)$$

vergrößert.

Die Schwingungsamplitude wird mit seismischen Gebern als Absolutbetrag gemessen. Wegen der gegenläufigen Bewegung von Fundament ("seismischer Block") und Prüfkörper im Resonanzfall, sind die registrierten Meßwerte der Schwingungsamplitude um den Faktor

$$k_2 = 1 - \frac{m}{M} \quad (27)$$

verkleinert.

Als Gesamtfehlerbetrag ergibt sich somit für die Überhöhung aus Gleichung (26) und (27):

$$k = k_1 \times k_2$$

$$k = \frac{\sqrt{1 + \frac{m}{M}}}{1 + \frac{m}{M}} \left( 1 - \frac{m}{M} \right) \quad (28)$$

$$k = \frac{1 - \frac{m}{M}}{\sqrt{1 + \frac{m}{M}}}$$

Die Auswertung der Resonanzkurven ergibt also eine zu kleine Resonanzamplitude und damit eine zu große Dämpfung. Es handelt sich dabei um eine linear konstante Fehlergröße.

Die Auswertung der Gleichung [28] für die einzelnen Prüfkörper ergibt für die Dämpfung (D) die folgenden Fehlergrößen:

|                        |        |
|------------------------|--------|
| Mauerwerkswand 11,5 cm | +2,4 ‰ |
| Mauerwerkswand 24 cm   | +4,9 ‰ |
| Stahlbetonwand 11,5 cm | +2,8 ‰ |
| Triplexstab            | +0,6 ‰ |

- Richtung des Durchfahrens der Resonanzkurve

Im Gegensatz zu H. Lenk /25/, der den Unterschied beim Durchfahren der Resonanzkurve von links nach rechts beziehungsweise von rechts nach links als sehr gering, das heißt unter einem Prozent bei Stahlbetonbalken bezeichnet, zeigte sich bereits bei den Vorversuchen mit Mauerwerkswänden, daß nur das Durchfahren von rechts nach links, das heißt von hohen zu niedrigen Frequenzen auswertbare Kurven ergibt. In Abbildung 18 sind zwei Kurven dargestellt, die bei gleicher Beanspruchung von links nach rechts beziehungsweise von rechts nach links durchfahren wurden. Der Hauptgrund für die gravierenden

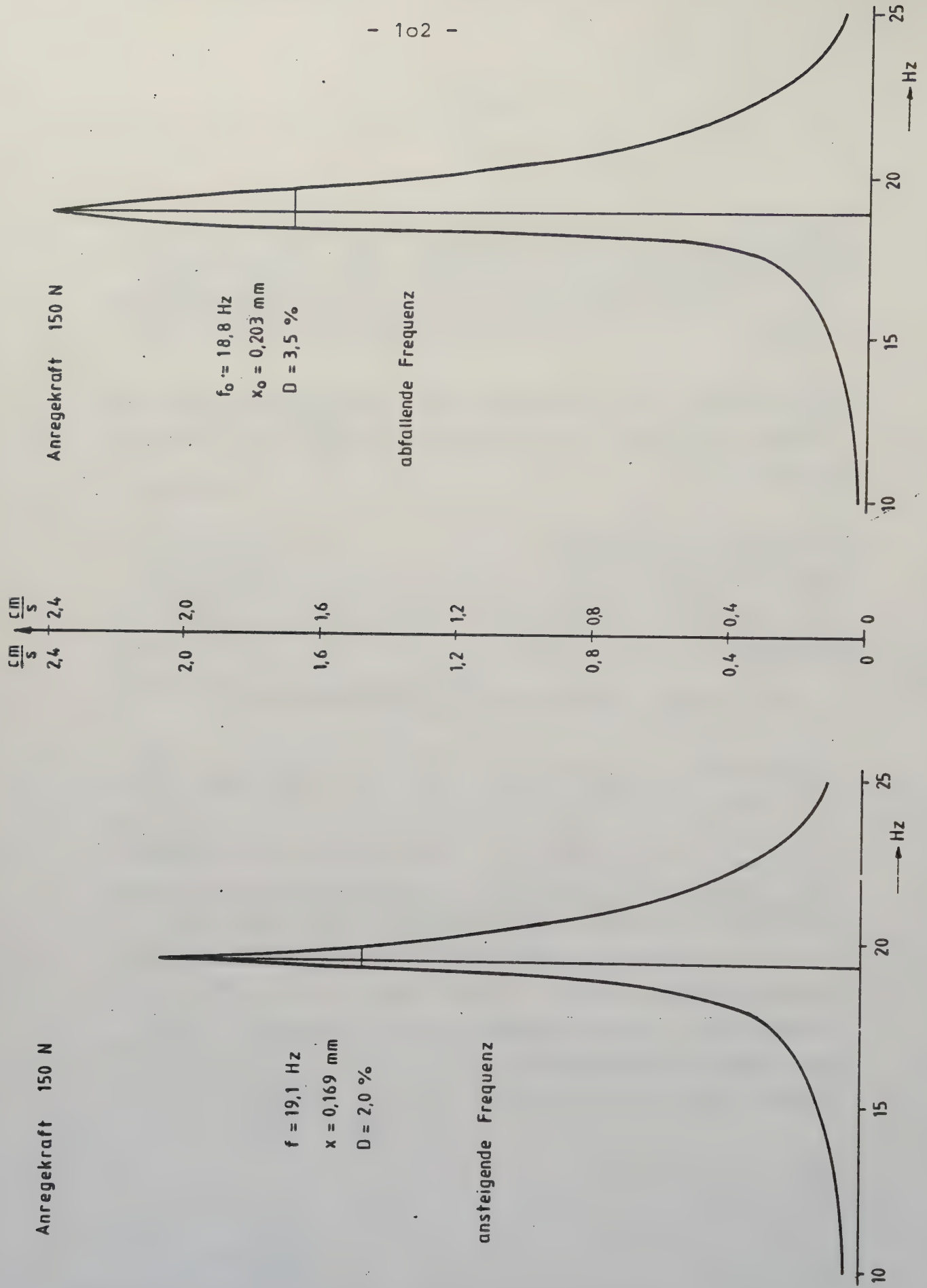


Abbildung 18 ansteigende - abfallende Frequenz

Unterschiede zu den Ergebnissen von H. Lenk /25/ liegt im Gefügeaufbau des Mauerwerkes im Gegensatz zu den von H. Lenk getesteten Spannbeton- und Stahlbetonbalken. In dem Gefüge Stein-Mörtel-Stein bilden sich bereits bei einem sehr niedrigen Beanspruchungsniveau Mikrorisse, die diese Änderung der Resonanzkurve bewirken. Diese Änderung ist besonders beim 11,5 cm starken Mauerwerk im Läuferverband sehr ausgeprägt. Beim 24 cm starken Mauerwerk im Blockverband wird dieser Effekt durch die gegenseitige Verklammerung stark abgemindert. Mit der Stahlbetonwand (d = 11,5 cm) konnten die Ergebnisse von H. Lenk /25/ im wesentlichen bestätigt werden.

#### - Verschiebung der Mittellinie

Bei der Aufzeichnung des Ausschwingvorganges kommt es zu Verschiebungen der Mittellinie auf dem Koordinatenschreiber. Um daraus resultierende Fehler bei der Amplitudenablesung zu vermeiden, wird die Einhüllende eingezeichnet und die Auswertung über die Doppelamplitude ( $A = 2a$ ) vorgenommen.

Die allgemeine Formel zur Bestimmung der Dämpfung über n Schwingungen (Gleichung 2) lautet dann

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n} \quad [29]$$

mit  $A = 2a$

$a$  = Amplitude.

Für kleinere Dämpfungen gilt noch mit guter Näherung

$$\Delta \approx 2 \left( \frac{A_0 - A_1}{A_0 + A_1} \right) \quad (30)$$

Durch die Auswertung der Ausschwingversuche mit der doppelten Amplitude mit den Gleichungen (29) und (30) wird der Fehler, der durch das ungewollte Verschieben der Mittellinie entsteht, unterdrückt.

- quasi-exponentieller Verlauf der Ausschwingkurve

Die in den Versuchen mit den Mauerwerkswänden und der Betonwand registrierten Ausklingverläufen zeigen einen nur noch angenäherten exponentiellen Verlauf. Dieses Verhalten resultiert aus dem Zusammenwirken von viskoelastischen Dämpfungskräften und ebenfalls dämpfend wirkenden Reibungskräften, die an den Flächen der Materialkorngrenzen und den Flächen von Struktur- und Rißfugen entstehen. Der viskoelastische Dämpfungsanteil, der dem Coulomb'schen Reibungsgesetz folgt, ist wegproportional, die dämpfende Reibungskraft  $R$  ist konstant. Die Hüllkurve der durch trockene Reibung gedämpften abklingenden Schwingung ist eine Gerade. Die Wegamplitude verringert sich mit jeder ganzen Periode um den Betrag  $\Delta A = 4 R/C$  (mit  $R$  = Reibungskraft und  $C$  = Federkonstante des Systems). Da es sich bei  $\Delta A$  um einen konstant abnehmenden Amplitudbetrag handelt, wird die Dämpfung mit kleiner werdender Amplitude  $A_0$  zunehmend größer. Der Dämpfungsanteil durch Reibung hat daher wesentliche Bedeutung bei kleinen Amplituden. Die Schwingung klingt schneller als eine rein geschwindigkeitslinear-gedämpfte Schwingung ab.

- Symmetrie der Resonanzkurve

Für die Ermittlung der Dämpfung aus der Halbwertsbreite der Resonanzkurve beziehungsweise für die Genauigkeit der Dämpfungswerte ist Voraussetzung, daß das System lineares Verhalten aufweist, das heißt die Resonanzkurve eine symmetrische Form hat. Diese ist bei den durchgeführten Versuchen bei kleinerer Anregekraft und kleiner Amplitude auch der Fall. Bei großen Amplituden neigen sich die Kurven zu niedrigen Frequenzen hin. Daraus ergibt sich ein unterlineares Verhalten des Systems. Parallel zur Unsymmetrie der Resonanzkurve ergibt sich eine Verschiebung der Eigenfrequenz nach unten beim Durchfahren der Resonanzstelle.

Die Unsymmetrie in der Resonanzkurve wird durch Rißbildung in den Mauerwerkswänden und der Betonwand hervorgerufen, das heißt die Federsteifigkeit des Systems nimmt ab. Ein zunächst lineares geschwindigkeits-proportionales Verhalten der Prüfkörper geht mit zunehmender Auslenkung in ein kombiniert geschwindigkeits-wegproportionales Verhalten über. Besonders deutlich wird dies bei der Betonwand.

- Vorspannung der Mauerwerkswände

Bei den Versuchen mit den Mauerwerkswänden mit Prüfaufbau Variante 1 und 2 wurde durch das Vorspannen der Zugstangen (Abbildung 9 und 10) eine Auflast von 8,35 kN beziehungsweise 25 kN erzeugt. Ein Vergleich der Dämpfungswerte zeigt, daß tendenziell eine Erhöhung der Auflast eine Vergrößerung der Dämpfungswerte erzeugt. Ein

mathematischer Zusammenhang zwischen Auflast und Dämpfungsgröße kann aus der geringen Anzahl der Versuche mit Auflast nicht hergestellt werden.

- Einspannungseffekte

Beim Prüfaufbau Variante 3 (Abbildung 11, Seite 38) sind die Prüfkörper oben und unten in der U-Profilschiene gefaßt. Mit zunehmender Amplitude neigen sich die Resonanzgipfel bei den Kalksandsteinwänden zu höheren Frequenzen hin.

Das System zeigt hierbei also ein überlineares Verhalten. Die Dämpfungskräfte sind proportional zur Schwinggeschwindigkeit. Erklärbar wird diese Erscheinung mit der Ausbildung der Risse, die im wesentlichen immer horizontal entlang der Mörtelfugen verlaufen. Beim Schwingen klaffen nun diese Risse auf der konvexen Wandseite, während es auf der konkaven Wandseite zu erhöhten vertikalen Drücken in den Fugen kommt. Da die Bindungskräfte in den bereits gerissenen Fugen nicht mehr vorhanden sind, wird die Federkonstante des Systems nun wesentlich durch die mit zunehmender Auslenkung ansteigenden Spreizkräfte bestimmt.

Dieses zunächst deutlich überlineare Verhalten wird bei wiederholtem Durchlauf mit gleicher Erregerkraft abgebaut. Bei einer Wiederholung auf kleinerem Beanspruchungsniveau zeigt die Kurvenform dann wieder unterlineares Verhalten an.

## 8. Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Schwingungsversuche an Mauerwerkswänden verschiedener Waddicken behandelt. Die Untersuchungen hatten den Zweck, Dämpfung bei Mauerwerkswänden unter bestimmten Bedingungen wirklichkeitsnah zu ermitteln.

Die Erregung und die Messung der Schwingungen erfolgten auf elektrodynamischem Wege. Die verschiedenen Einflüsse der Versuchsanordnung

- Fundamentbewegung
- Richtung des Durchfahrens der Resonanzkurve
- Verschiebung der Mittellinie des Koordinatenschreibers
- quasi-exponentieller Verlauf der Ausschwingkurve
- Symmetrie der Resonanzkurve
- Vorspannung der Mauerwerkswände
- Einspannungseffekte

wurden experimentell erfaßt und berücksichtigt.

Der geschilderte Aufbau und die Durchführung der Versuche stellen - soweit bekannt - die erste Lösung dieses Problems mit Mauerwerkswänden dar. Der Versuchsaufbau - insbesondere die Variante 3 mit der Kopf- und Fußhalterung der Wände mit U-Profilschienen - hat sich im wesentlichen bewährt. Es hat sich gezeigt, daß die erforderliche Messung von Frequenz und Amplitude sowie deren Registrierung mit erträglichem Aufwand möglich war. Die zusätzlich durchgeführten Ausschwingversuche, die im Bereich kleiner Dämpfungen, das heißt im elastischen Bereich, über die Bestimmung des logarithmischen Dekrementes eine Kontrolle der Resonanzversuche darstellen, haben sich zur Bewertung der Gesamtergebnisse als sehr hilfreich erwiesen. Bei allen Prüfkörpern (Mauerwerkswände, Betonwand und Triplexstab) wurde eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den in den Ausschwingversuchen und in den Resonanzversuchen ermittelten Dämpfungswerten gefunden. Im Bereich kleiner Amplituden ist die Ermittlung der Dämpfung aus den Ausschwingversuchen genauer, das

mit weniger Imponderabilien behaftet, als die Ermittlung der Dämpfung aus den Resonanzkurven. Bei weiteren ähnlichen Versuchen wäre zu prüfen, ob die oft mühselige Arbeit der Auswertung der Resonanzkurven nicht direkt aus den Meßsignalen über einen Computer erfolgen könnte. Dafür müßte am grundsätzlichen Versuchsaufbau nichts geändert werden.

Die Versuche und Ergebnisse mit der Betonwand stimmen in den wesentlichen Ergebnissen und Tendenzen mit den Arbeiten /17/, /25/ und /29/ überein. Diese Übereinstimmung ist ein Beleg dafür, daß die Versuchsergebnisse mit den Mauerwerkswänden, für die es keine vergleichbare Untersuchung gibt, nicht durch im Versuchsaufbau oder in der Versuchsdurchführung liegenden systemimmanenten Fehlern behaftet sind.

Die Form der Resonanzkurven bei den Mauerwerksversuchen beziehungsweise die Unterschiede der Resonanzkurven beim Durchfahren des Frequenzbandes von unten oder von oben weisen darauf hin, daß die Spannungs-Dehnungs-Beziehung des aus den Komponenten Steine und Mörtel zusammengesetzten Werkstoffes Mauerwerk nicht ohne weiteres durch ein einfaches Stoffgesetz beschrieben werden kann.

Ein solches Stoffgesetz müßte folgendes berücksichtigen: einen linear-elastischen Anteil (Hook'sches Gesetz), einen nichtlinear-elastischen Anteil für den Einfluß der Verfestigung in den höheren Spannungsbereichen,

einen linear-viskosen Anteil, der die geschwindigkeitsproportionale Dämpfung beschreibt, die in dieser Arbeit im besonderen untersucht wurde und einen nichtlinear-viskosen Anteil für den Dämpfungsanteil proportional höherer Potenzen der Geschwindigkeit.

Da bei dieser Beschreibung die viskosen Anteile außerdem mit verschiedenen Zähigkeiten auftreten können, scheint es aussichtslos zu sein, die Dämpfung von Mauerwerkswänden rechnerisch wirklichkeitsnah erfassen zu wollen. Für die mathematische Behandlung bleibt nach wie vor nur der linearisierte Ansatz für die Dämpfungskräfte praktikabel, bei dem die gesamte auftretende Dämpfung dem geschwindigkeitsabhängigen Glied  $D \cdot \dot{q}$  der Systemgleichung des gedämpften, diskreten Systems

$$M \cdot \ddot{q} + D \cdot \dot{q} + K \cdot q = 0$$

zugewiesen wird.

Die Versuchsauswertungen zeigen, daß für die untersuchten Mauerwerkswände beim Anstieg der Beschleunigung, das heißt bei größeren Amplituden, ein Absinken der Eigenfrequenz bei gleichzeitigem Anstieg der Dämpfung zu verzeichnen ist. Die bei hohen Beschleunigungen gemessenen Dämpfungen liegen deutlich über dem Niveau der in der Literatur /38/ angegebenen Werten von 4 %, wobei die Tendenz zu weiterem Anstieg der Dämpfung bei weiterer Vergrößerung der Amplitude deutlich wird. Die ermittelten Dämpfungswerte bei hoher Belastung liegen hauptsächlich in einem Bereich zwischen 10 und 25 %, wobei das Anwachsen der Dämpfungswerte infolge einer Erhöhung des Beanspruchungsniveaus signifikant ist.

## 9. Aufzeichnungen der Versuche

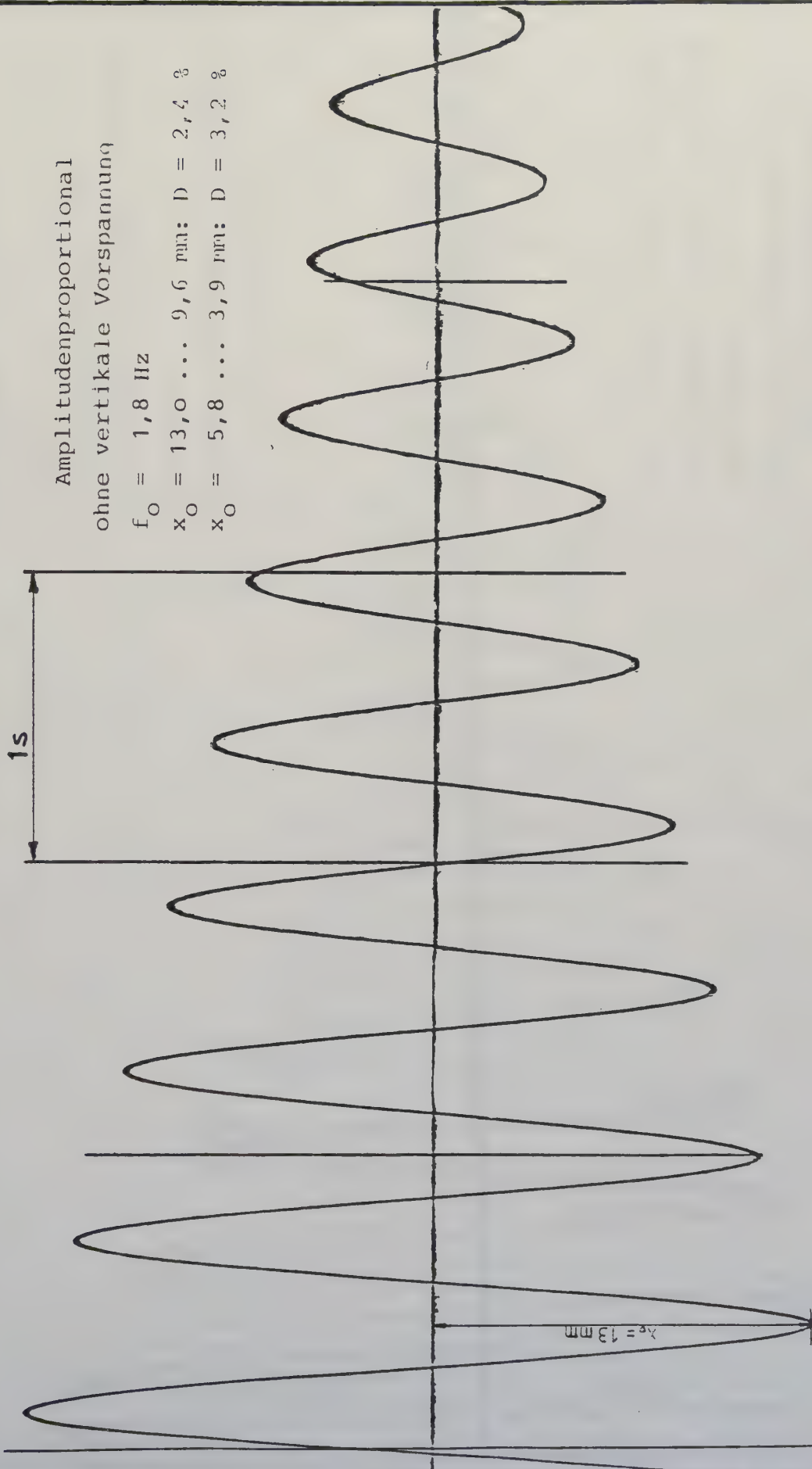
### 9.1 Mauerwerkswände

|                                                                                                                                   | Seite |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| a) 1. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1. Versuch),<br>Wertetabelle, Anregung von Hand, Prüfaufbau<br>Variante 1                        | 112   |
| b) 1. Kalksandsteinwand 11,5 cm (2.-4.Vers.),<br>Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem<br>Erreger, Prüfaufbau Variante 1 und 2 | 119   |
| c) 2. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1.u.2.Vers.),<br>Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem<br>Erreger, Prüfaufbau Variante 1      | 129   |
| d) 3. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1.-3. Vers.),<br>Wertetabelle, Anregung über Fundament-<br>block, Prüfaufbau Variante 1 und 2    | 135   |
| e) 3. Kalksandsteinwand 11,5 cm (4. Versuch),<br>Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem<br>Erreger, Prüfaufbau Variante 2       | 145   |
| f) 3. Kalksandsteinwand 11,5 cm (5. Versuch),<br>Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem<br>Erreger, Prüfaufbau Variante 2       | 155   |
| g) 4. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1. Versuch),<br>Wertetabelle, Anregung über Fundament-<br>block, Prüfaufbau Variante 3           | 160   |

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| h) 4. Kalksandsteinwand 11,5 cm (2. Versuch),<br>Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem<br>Erreger, Prüfaufbau Variante 3  | 162 |
| i) 4. Kalksandsteinwand 11,5 cm (3.-5. Vers.),<br>Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem<br>Erreger, Prüfaufbau Variante 3 | 166 |
| j) Kalksandsteinwand 24 cm (1. u. 2. Versuch),<br>Wertetabelle, Anregung über Fundamentblock,<br>Prüfaufbau Variante 1       | 174 |
| k) Kalksandsteinwand 24 cm (3. u. 4. Versuch),<br>Wertetabelle, Anregung bei angekoppeltem<br>Erreger, Prüfaufbau Variante 1 | 181 |
| l) Kalksandsteinwand 24 cm (5. Versuch),<br>Wertetabelle, Anregung über Fundamentblock,<br>Prüfaufbau Variante 2             | 187 |

| Anregungs-<br>kraft<br>(N)                                                                      | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz) | Mauermitte<br>Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Mauermitte<br>Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1. Vers.), Wertetabelle, Anregung von Hand, Prüfaufbau Variante 1 |                 |                  |                                                     |                                         |                   |                                 |                                 |
|                                                                                                 | 2,4             | 1,8              |                                                     |                                         |                   |                                 | 13,0                            |
|                                                                                                 | 3,2             | 1,8              |                                                     |                                         |                   |                                 | 5,8                             |
|                                                                                                 | 2,6             | 3,4              |                                                     |                                         |                   |                                 | 13,7                            |
|                                                                                                 | 2,6             | 3,4              |                                                     |                                         |                   |                                 | 2,9                             |
|                                                                                                 | 2,4             | 2,8              |                                                     |                                         |                   |                                 | 13,8                            |
|                                                                                                 | 3,0             | 2,8              |                                                     |                                         |                   |                                 | 3,6                             |
|                                                                                                 | 2,8             | 3,8              |                                                     |                                         |                   |                                 | 14,1                            |
|                                                                                                 | 2,5             | 3,8              |                                                     |                                         |                   |                                 | 3,3                             |
|                                                                                                 | 2,6             | 4,2              |                                                     |                                         |                   |                                 | 14,0                            |
|                                                                                                 | 2,5             | 4,2              |                                                     |                                         |                   |                                 | 3,0                             |
|                                                                                                 | 2,7             | 4,4              |                                                     |                                         |                   |                                 | 13,4                            |
|                                                                                                 | 2,3             | 4,4              |                                                     |                                         |                   |                                 | 2,9                             |

Meßpunkt: Mauerkrone



Meßpunkt: Mauerkrone

- 114 -

1. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1.Vers.)

Ausschwingvorgang

Anregung von Hand

Prüfaufbau

Variante 1

Amplitudenproportional  
vertikale Vorspannung 8340 N

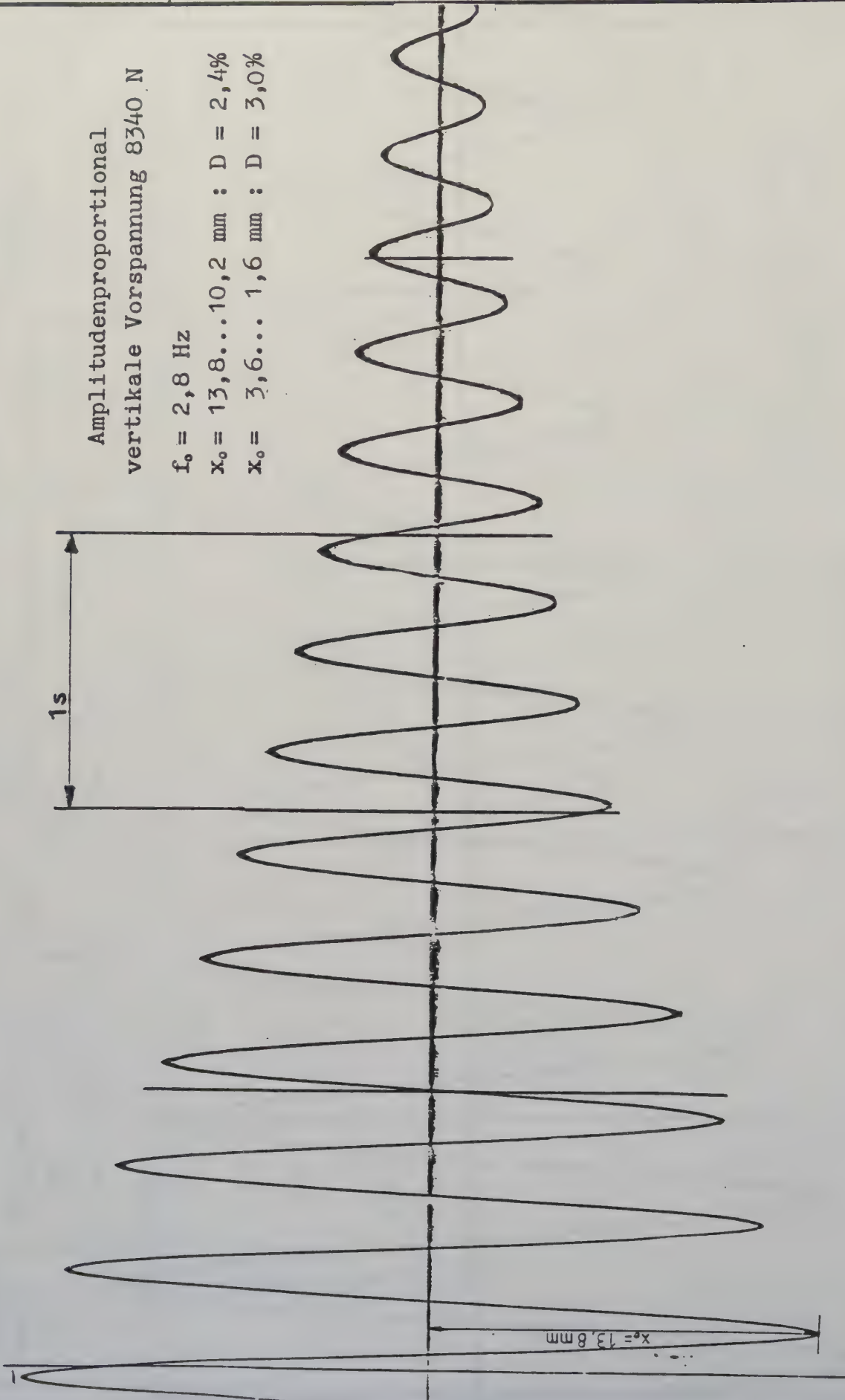
$f_0 = 2,8 \text{ Hz}$

$x_0 = 13,8 \dots 10,2 \text{ mm} : D = 2,4\%$

$x_0 = 3,6 \dots 1,6 \text{ mm} : D = 3,0\%$

1 s

$x_0 = 13,8 \text{ mm}$



Meßpunkt: Mauerkrone

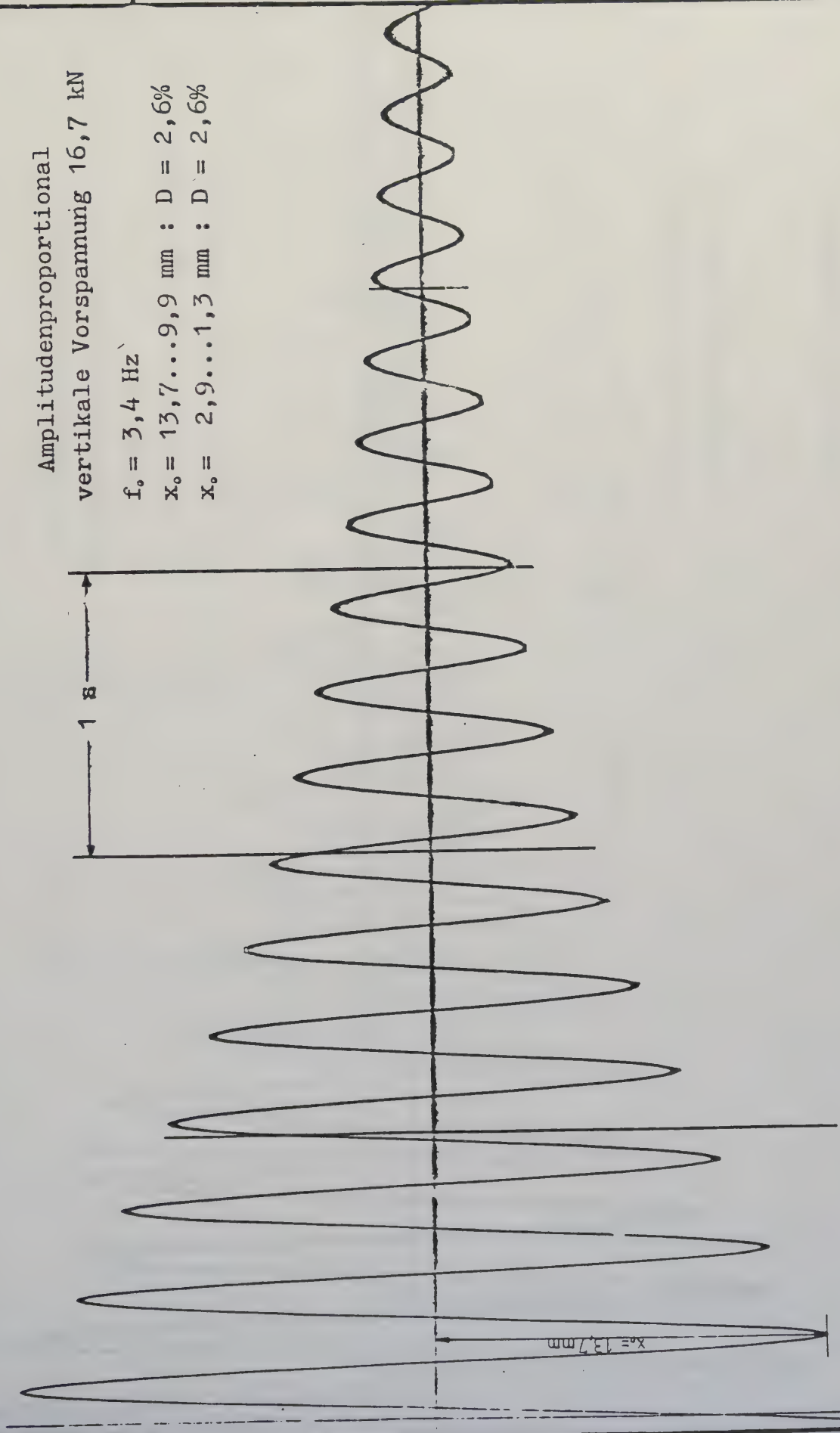
Amplitudenproportional

vertikale Vorspannung 16,7 kN

$f_0 = 3,4 \text{ Hz}$

$x_0 = 13,7 \dots 9,9 \text{ mm} : D = 2,6\%$

$x_0 = 2,9 \dots 1,3 \text{ mm} : D = 2,6\%$



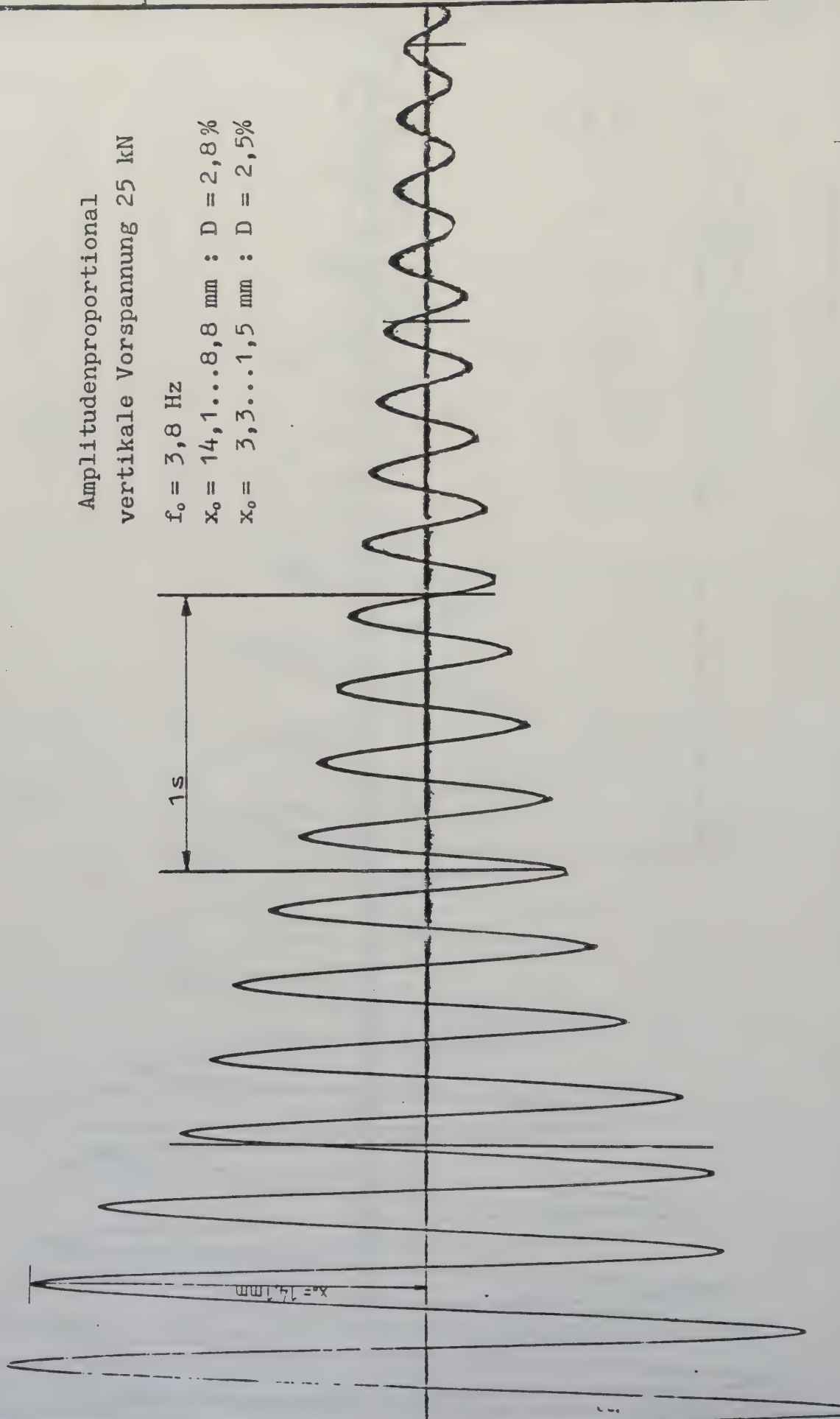
Meßpunkt: Mauerkrone

Amplitudenproportional  
vertikale Vorspannung 25 kN

$f_0 = 3,8 \text{ Hz}$

$x_0 = 14,1 \dots 8,8 \text{ mm} : D = 2,8 \%$

$x_0 = 3,3 \dots 1,5 \text{ mm} : D = 2,5 \%$



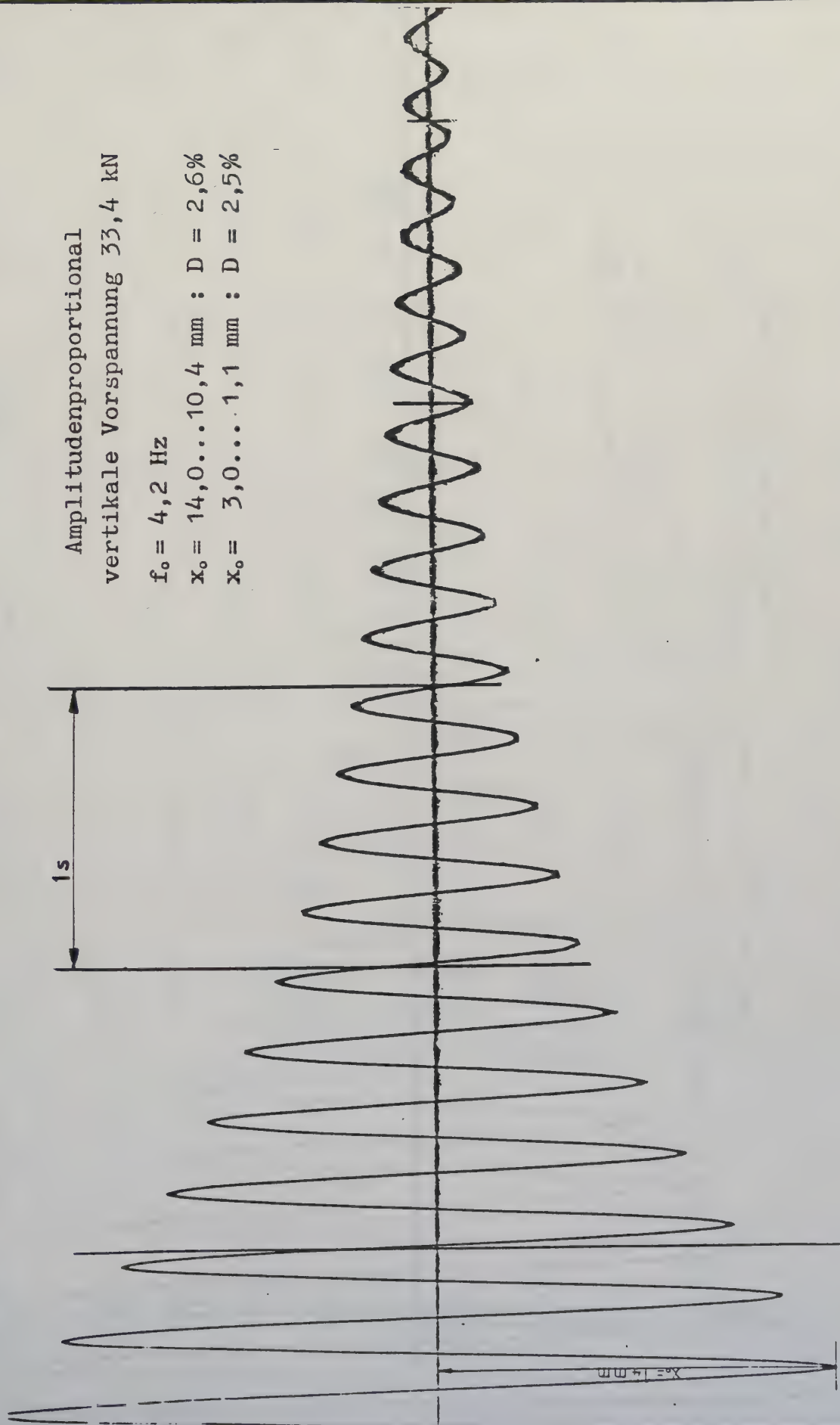
Meßpunkt: Mauerkrone

Amplitudenproportional  
vertikale Vorspannung 33,4 kN

$f_0 = 4,2 \text{ Hz}$

$x_0 = 14,0 \dots 10,4 \text{ mm} : D = 2,6\%$

$x_0 = 3,0 \dots 1,1 \text{ mm} : D = 2,5\%$



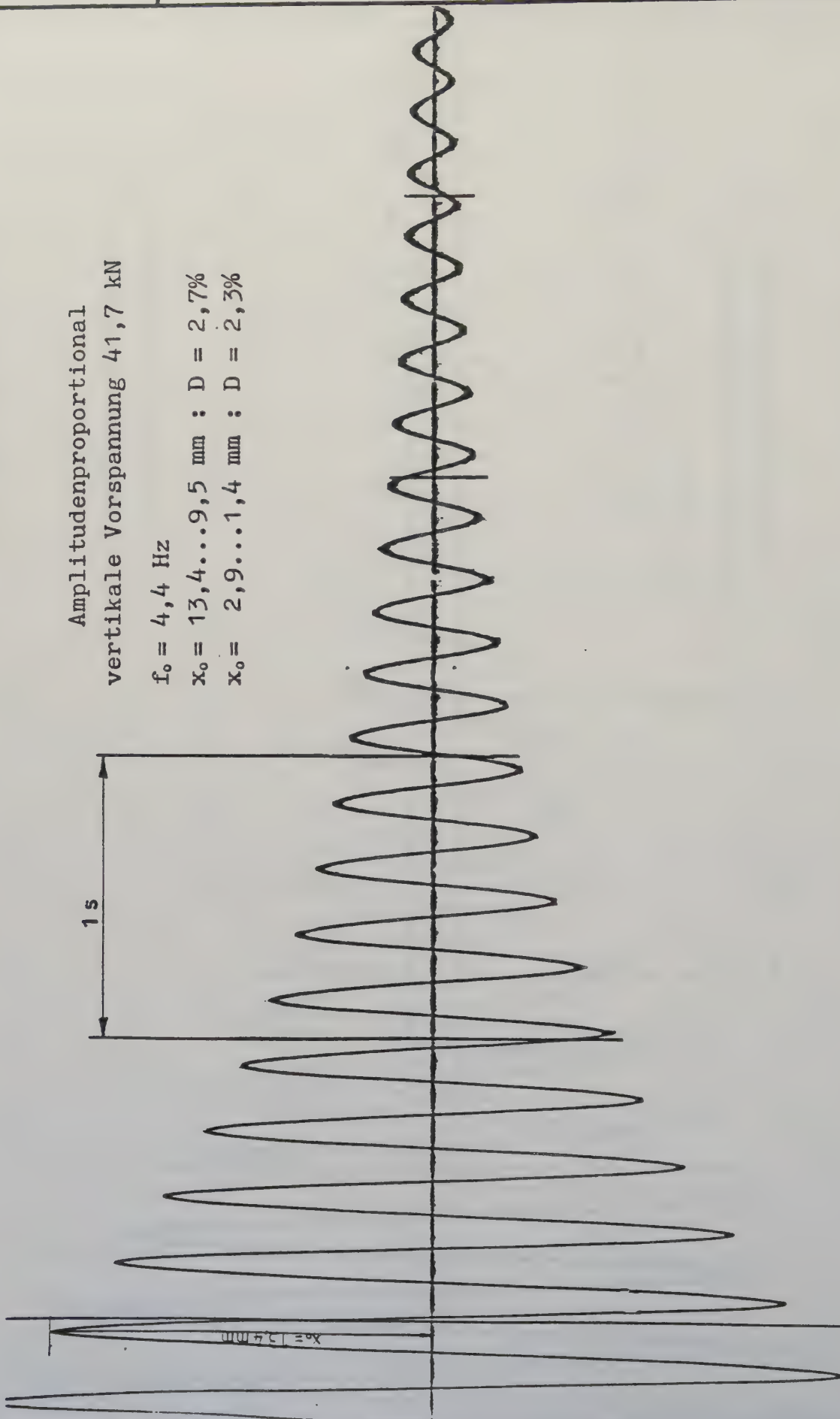
Meßpunkt: Mauerkrone

Amplitudenproportional  
vertikale Vorspannung 41,7 kN

$f_0 = 4,4 \text{ Hz}$

$x_0 = 13,4 \dots 9,5 \text{ mm} : D = 2,7\%$

$x_0 = 2,9 \dots 1,4 \text{ mm} : D = 2,3\%$



| Anregerkraft<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermittel      |                                       |                           |                   | Anregenkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>$Z$<br>(Ns/m) |
|---------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------|
|                     |                 | Frequenz<br>(Hz) | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) |                                 |                           |
| 100                 | 5,0*            | 19,7             | 10,42                                 | 8,42                      | 0,68              | 0,42                            | 1188                      |
| 200                 | -               | 19,1             | 19,30                                 | 16,08                     | 1,34              | 0,66                            | 1244                      |
| 300                 | -               | 11,4             | 12,06                                 | 16,83                     | 2,35              | 1,32                            | 1786                      |
| 400                 | -               | 10,4             | 12,30                                 | 18,82                     | 2,88              | 1,81                            | 2125                      |
| 600                 | -               | 8,8              | 15,29                                 | 27,65                     | 5,00              | 3,07                            | 2170                      |
| 1000                | -               | 6,2              | 12,44                                 | 31,94                     | 8,20              | 5,48                            | 3131                      |
| 1500                | -               | 5,2              | 13,45                                 | 41,17                     | 12,60             | 8,57                            | 3643                      |
| 2000                | -               | 6,5              | 25,35                                 | 62,08                     | 15,20             | 10,16                           | 3222                      |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve

- 120 -

1. Kalksandsteinwand 11,5 cm (2. Vers.)

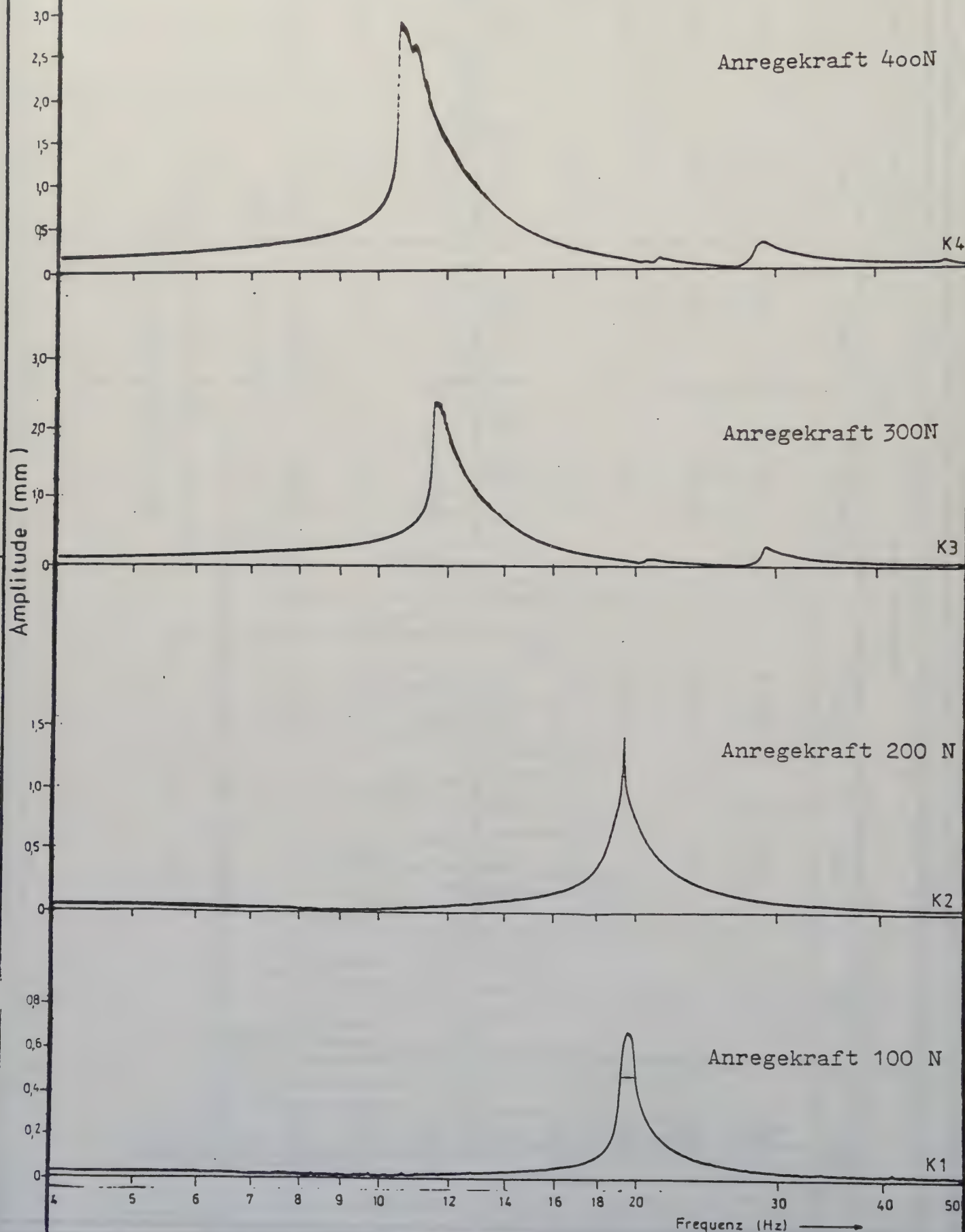
Prüfaufbau

Resonanzkurven

Variante 2

Anregung bei angekoppeltem Erreger

vertikale Vorspannung 8340 N



vertikale Vorspannung 21 kN

Anregekraft 2000N

K 8

vertikale Vorspannung 8340 N

Anregekraft 1500N

K 7

Anregekraft 1000N

K 6

Anregekraft 600N

K 5

Amplitude (mm)

Frequenz (Hz) →

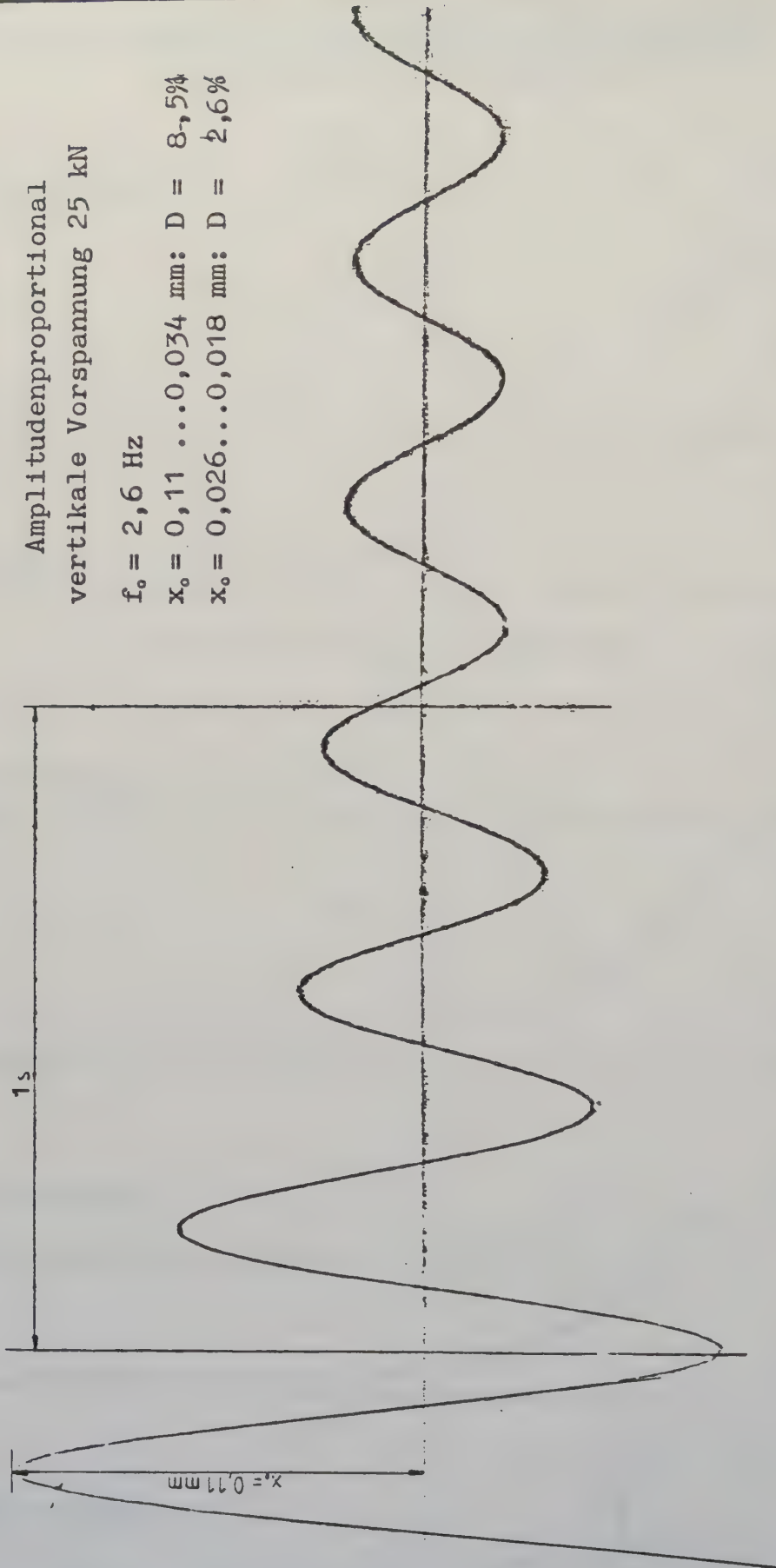
Meßpunkt: Mauermittte

Amplitudenproportional  
vertikale Vorspannung 25 kN

$$f_0 = 2,6 \text{ Hz}$$

$$x_0 = 0,11 \dots 0,034 \text{ mm}; D = 8,5\%$$

$$x_0 = 0,026 \dots 0,018 \text{ mm}; D = 2,6\%$$

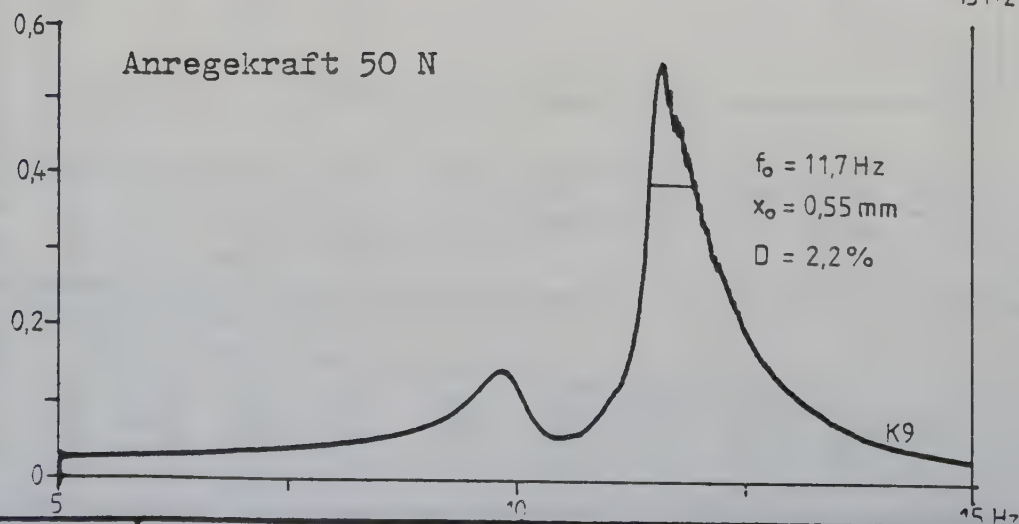
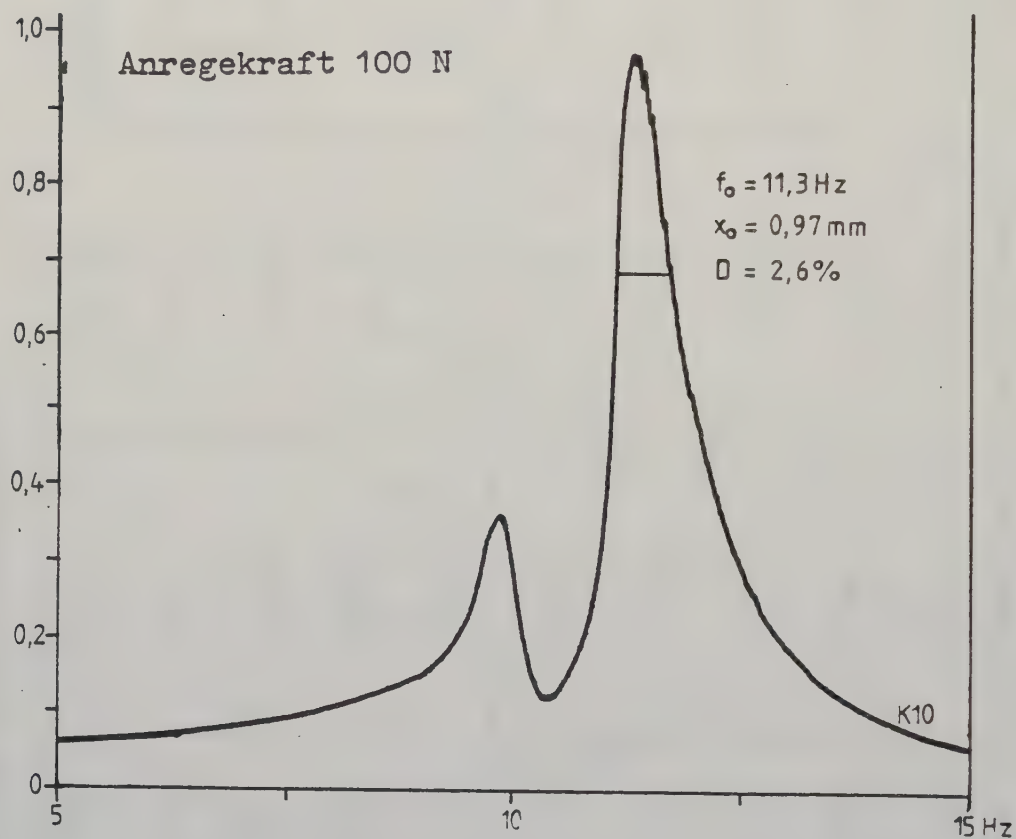
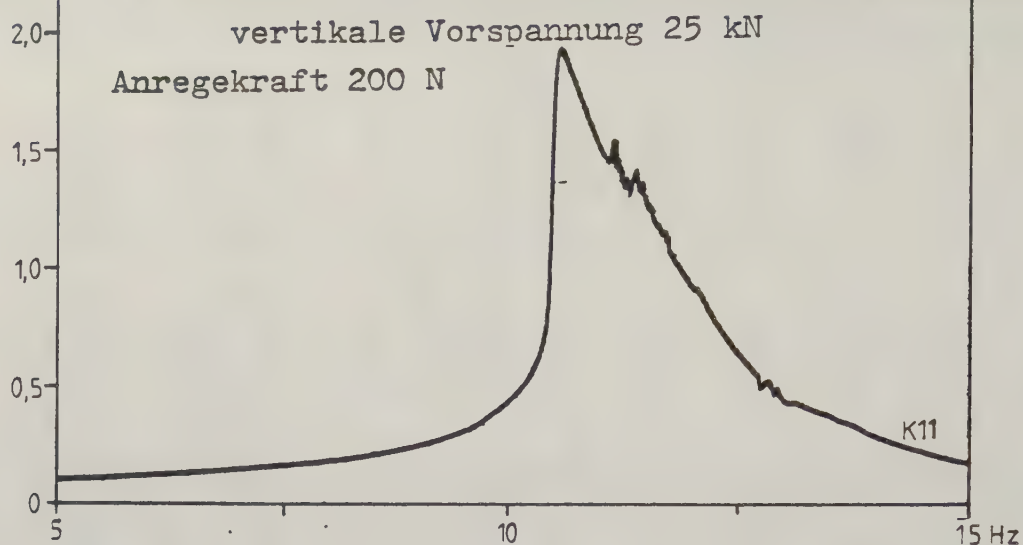


| Anregerkraft<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermittel      |                                       |                           | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>Z<br>(Ns/m) |
|---------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|
|                     |                 | Frequenz<br>(Hz) | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                                 |                         |
| 50                  | 2,1*<br>(1,9)   | 11,7             | 2,97                                  | 4,04                      | 0,38                            | 1238                    |
| 100                 | 2,6*<br>(2,8)   | 11,3             | 4,89                                  | 6,89                      | 0,70                            | 1451                    |
| 200                 | (4,3)           | 10,6             | 7,98                                  | 11,99                     | 1,39                            | 1668                    |
| 50                  | 2,2*            | 11,5             | 3,34                                  | 4,62                      | 0,46                            | 1082                    |
| 100                 | 2,3*            | 11,0             | 5,35                                  | 7,74                      | 0,80                            | 1292                    |
| 25                  | 1,8*            | 11,8             | 1,92                                  | 2,59                      | 0,25                            | 965                     |
| 300                 | (5,1)           | 10,3             | 10,97                                 | 16,96                     | 1,85                            | 1769                    |
| 500                 | (7,7)           | 9,7              | 14,86                                 | 24,38                     | 2,85                            | 2051                    |
| 750                 | (11,6)          | 9,4              | 18,14                                 | 30,71                     | 3,72                            | 2442                    |
| 1000                | (14,7)          | 9,0              | 21,27                                 | 37,60                     | 4,77                            | 2660                    |

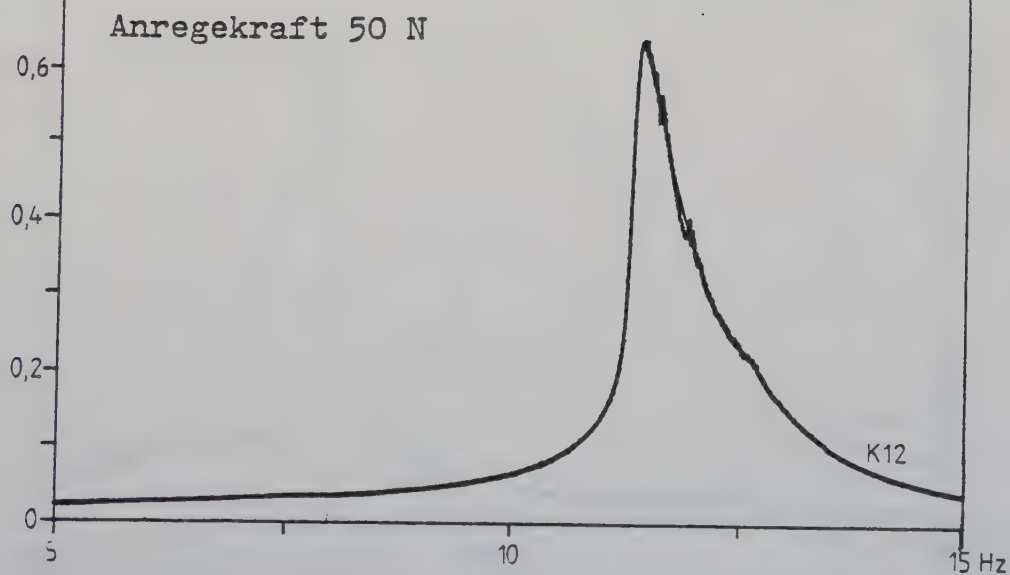
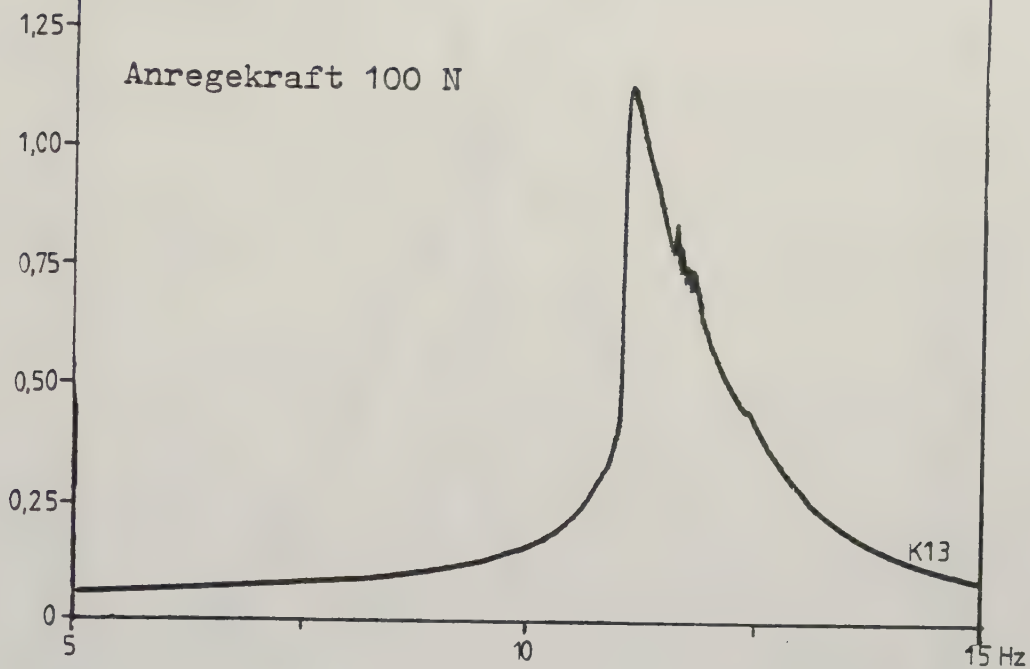
\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve

( ): ausgerechneter Wert:  $K_{1/2} = 1215 \text{ kg}$

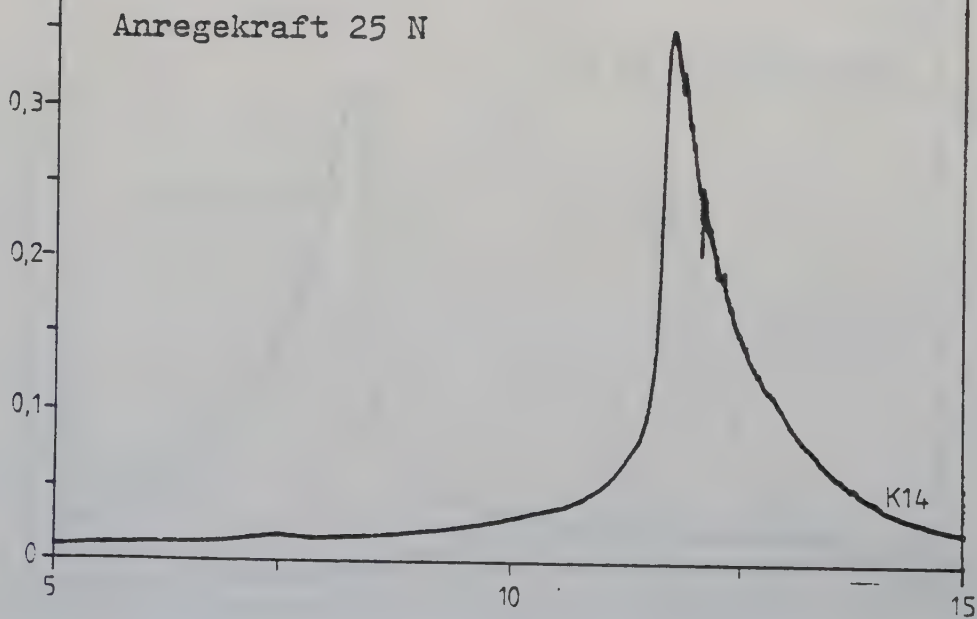
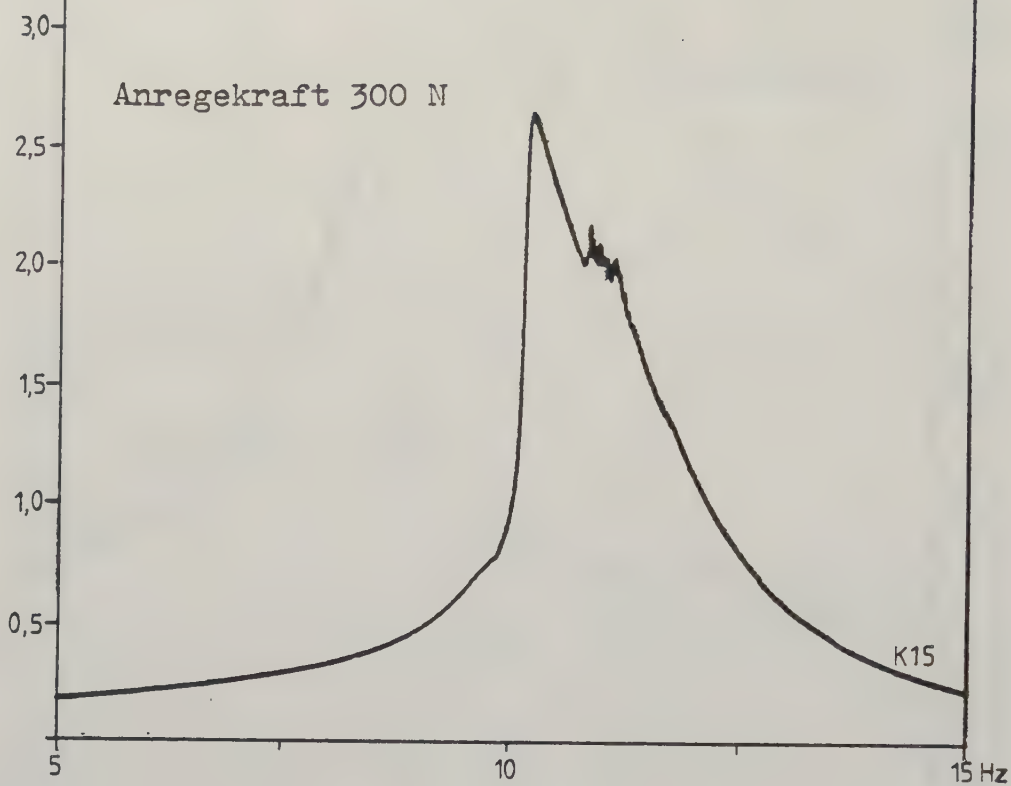
Amplitude [mm]



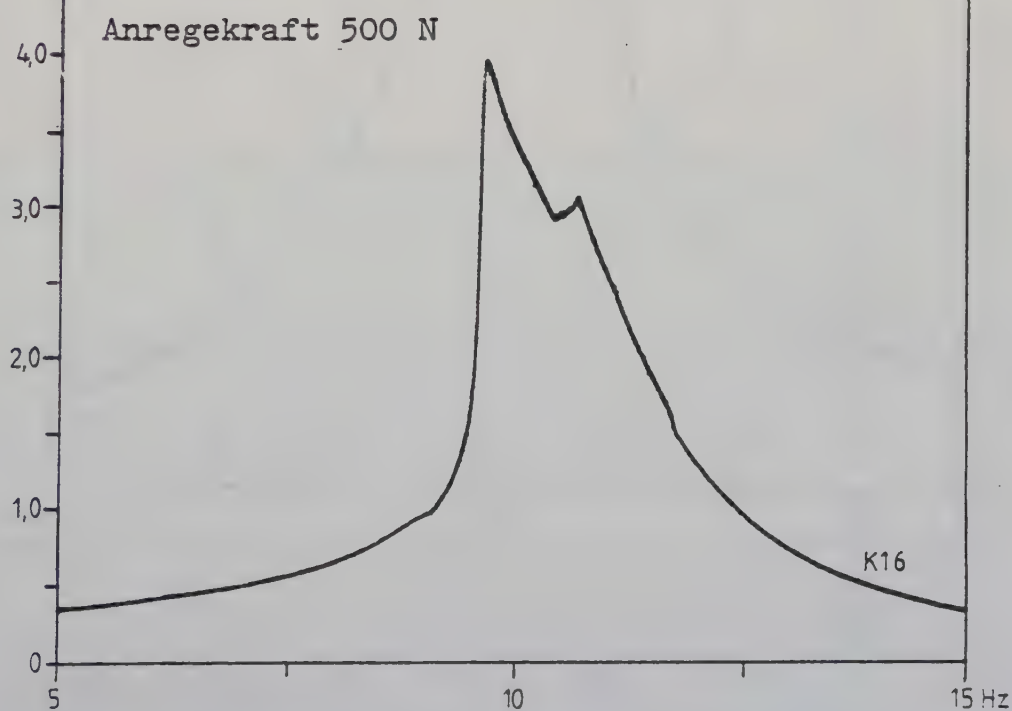
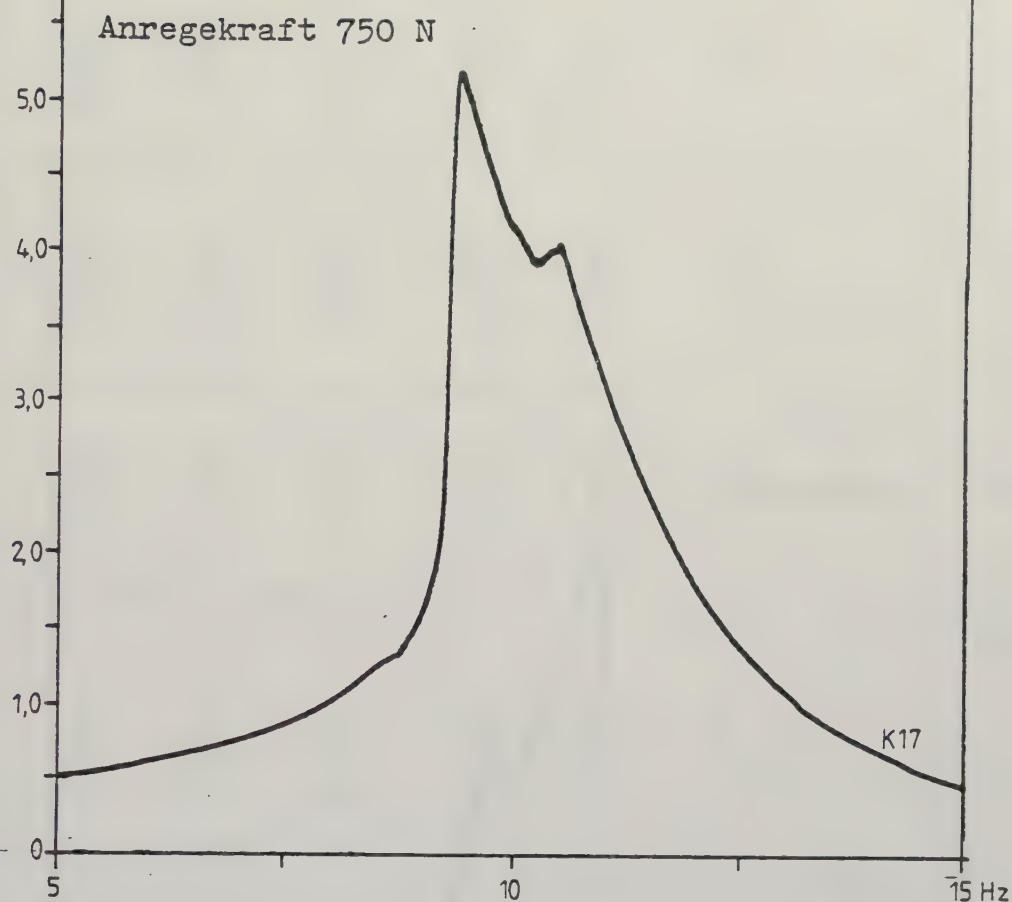
Amplitude [mm]

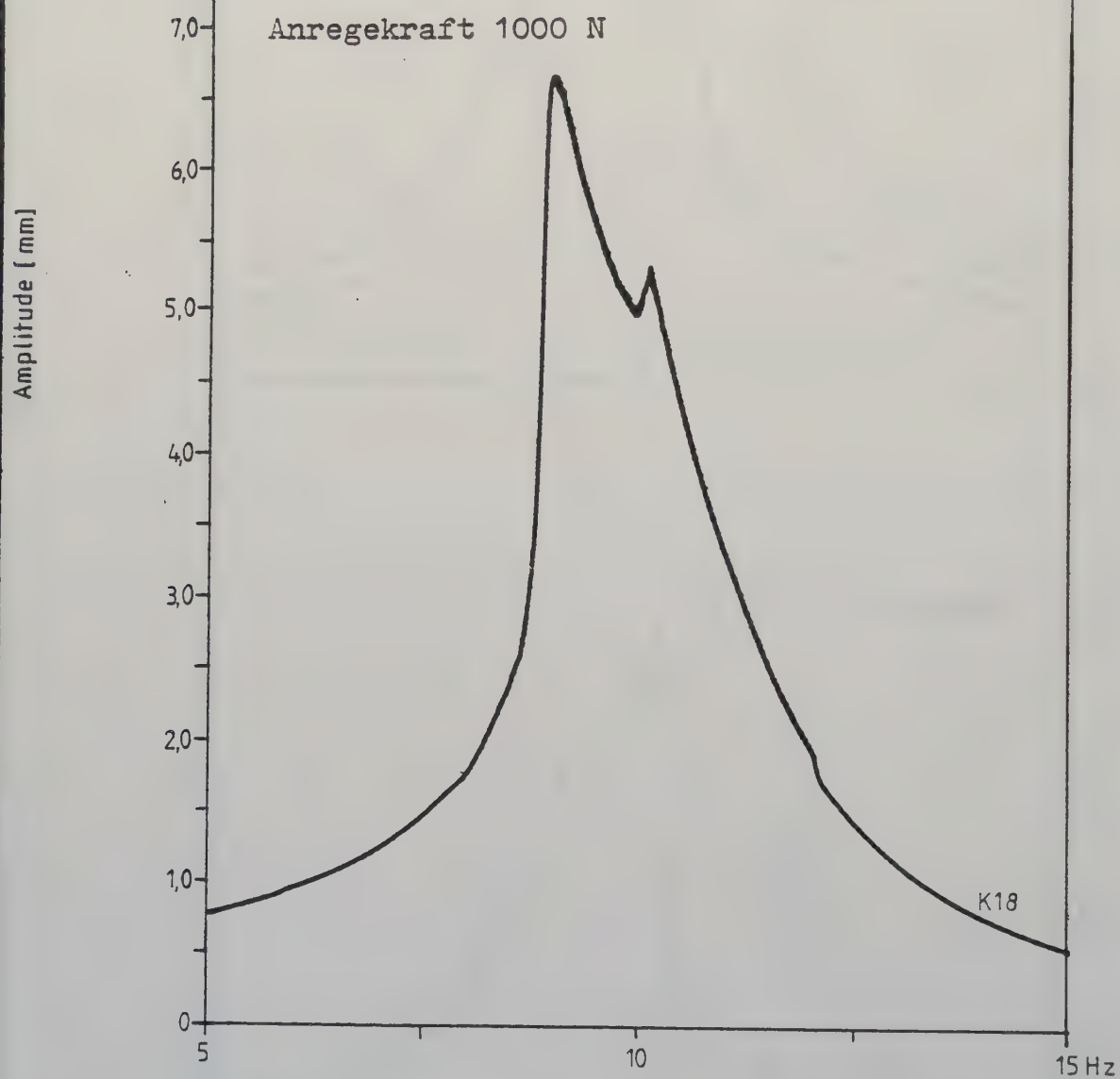


Amplitude [mm]



Amplitude [mm]

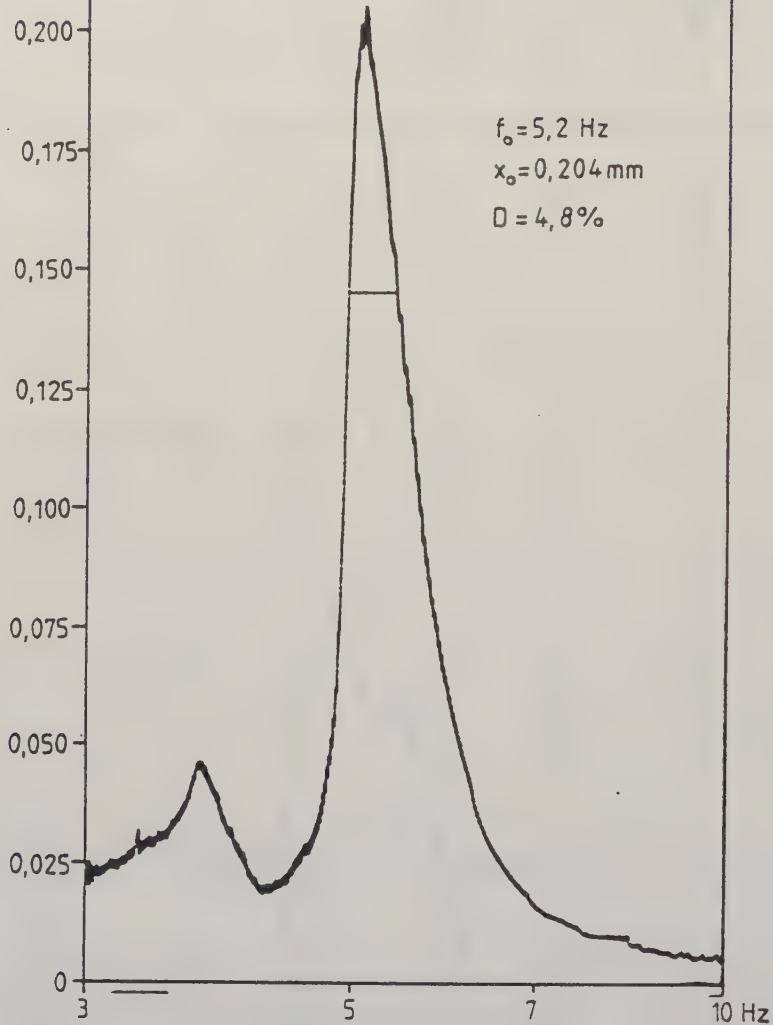




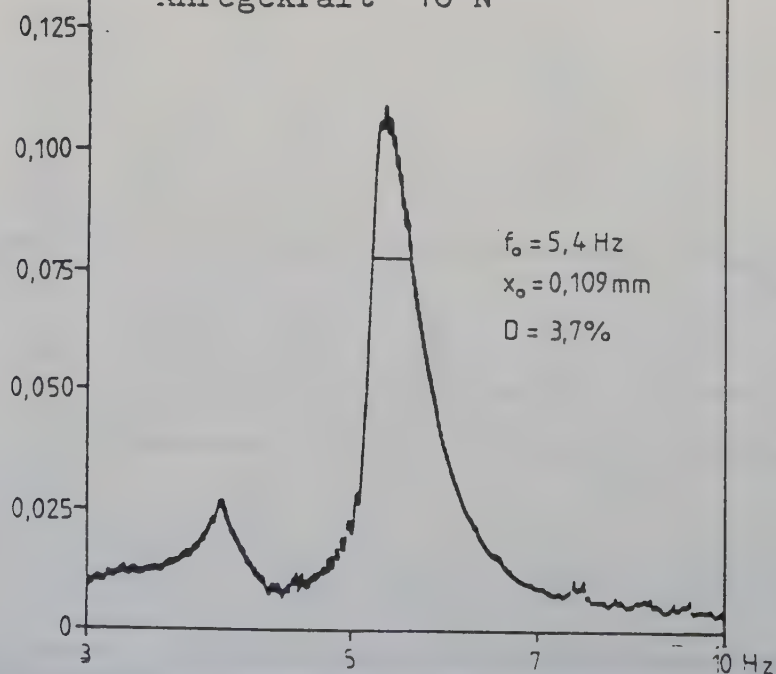
| - 129 -                                       |                | 2. Kalksandsteinwand 11,5 cm (1. Vers.) |                                       |                                          |                   | Prüfaufbau                      |                                 |
|-----------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                               |                | Wertetabelle                            |                                       |                                          |                   | Variante 1                      |                                 |
|                                               |                | Anregung bei angekoppeltem Erreger      |                                       |                                          |                   |                                 |                                 |
| Erregerkraft<br>(N)                           | Dämmung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz)                        | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Mauermittel<br>Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
| 10                                            | 3,7*           | 5,4                                     | 0,125                                 | 0,370                                    | 0,109             | 0,053                           | 0,245                           |
| 20                                            | 4,8*           | 5,2                                     | 0,218                                 | 0,666                                    | 0,204             | 0,098                           | 0,440                           |
| 30                                            | 5,3*           | 4,7                                     | 0,283                                 | 0,957                                    | 0,324             | 0,168                           | 0,711                           |
| 40                                            | 5,6*           | 4,5                                     | 0,341                                 | 1,207                                    | 0,427             | 0,230                           | 0,932                           |
| 50                                            | 7,0*           | 4,3                                     | 0,415                                 | 1,537                                    | 0,569             | 0,307                           | 1,256                           |
| 70                                            | 10,8*          | 3,7                                     | 0,487                                 | 2,095                                    | 0,901             | 0,490                           | 1,912                           |
| *: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve |                |                                         |                                       |                                          |                   |                                 |                                 |

Amplitude [mm]

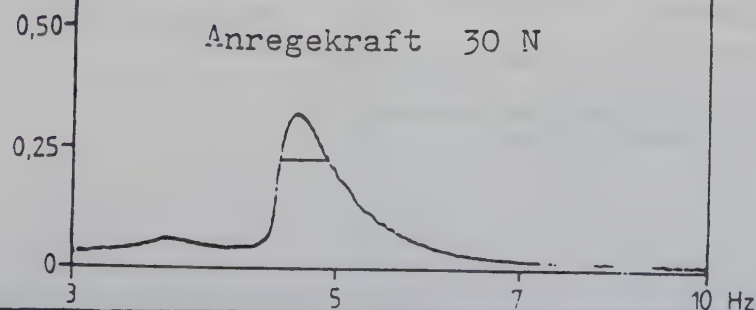
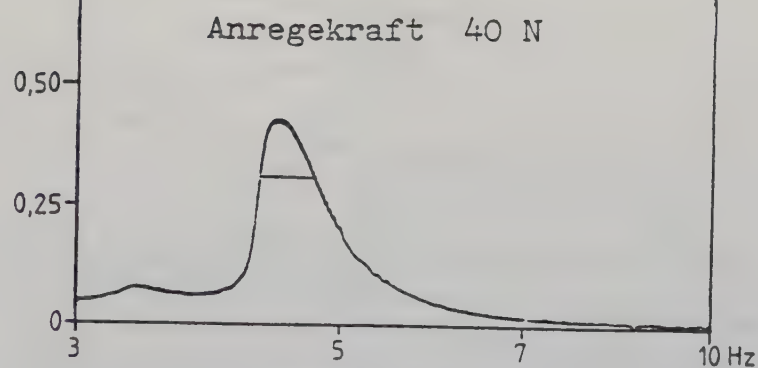
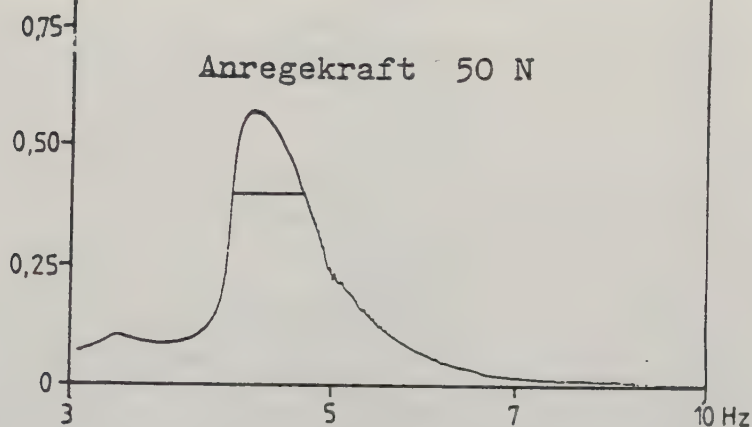
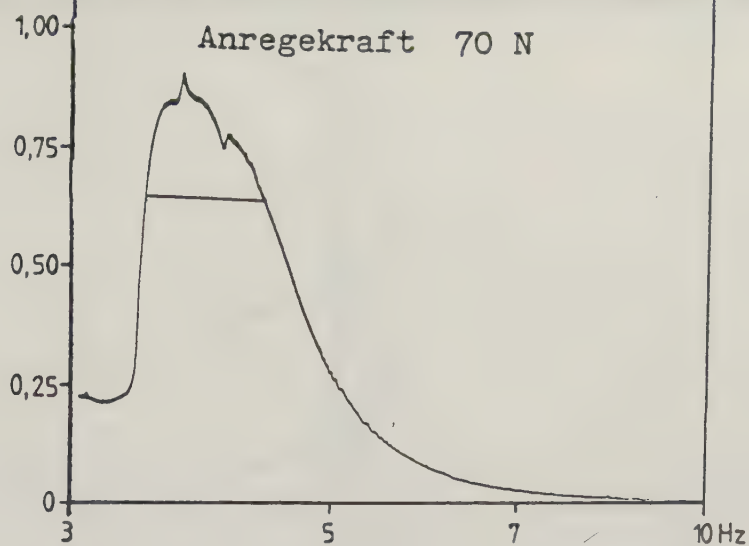
Anregekraft 20 N



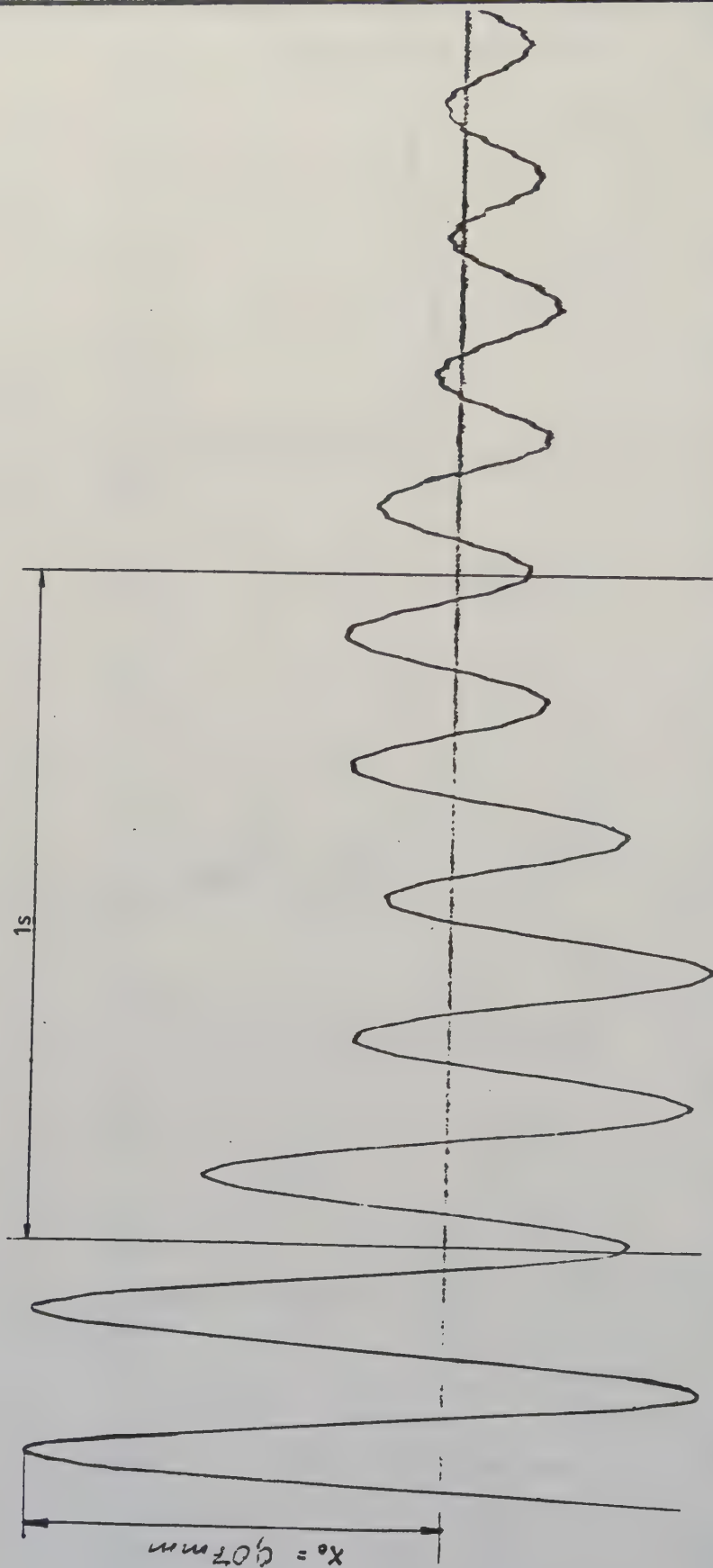
Anregekraft 10 N



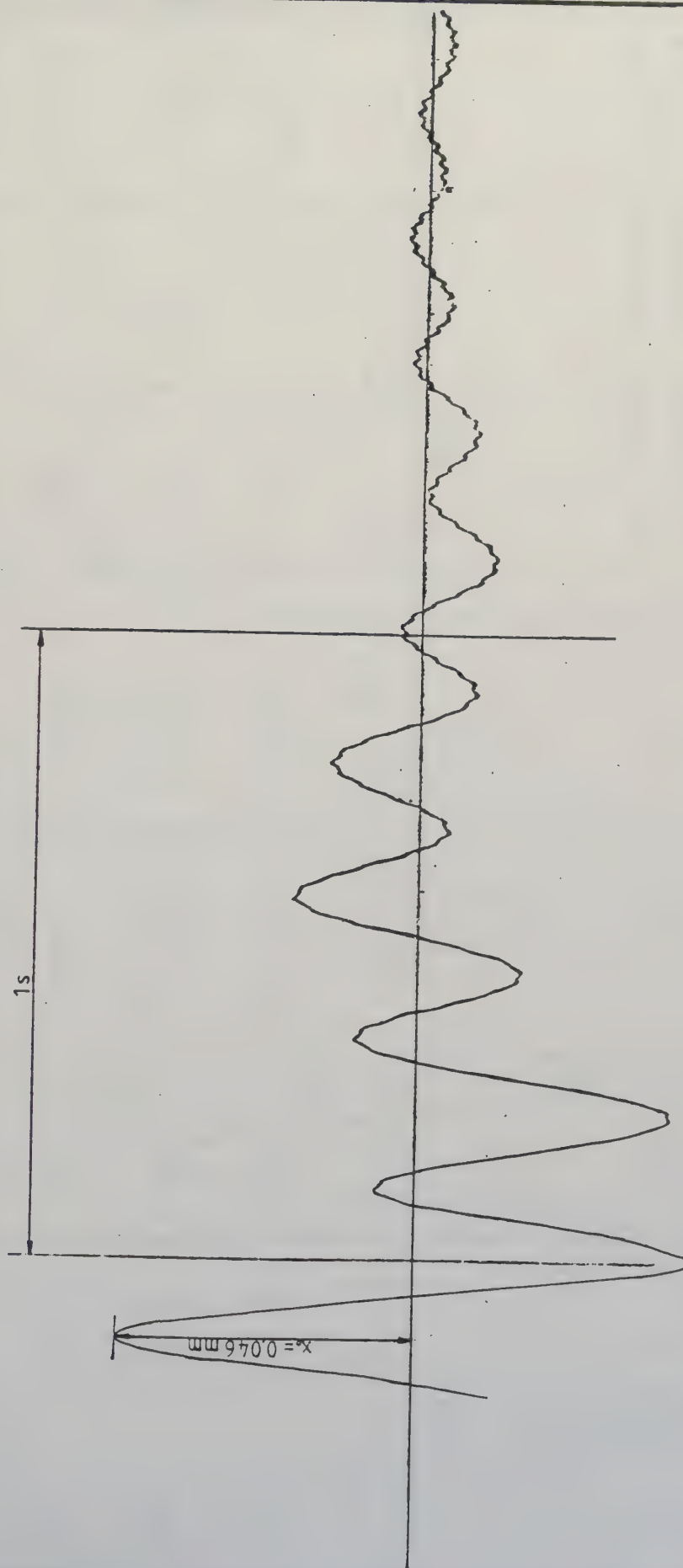
Amplitude [mm]



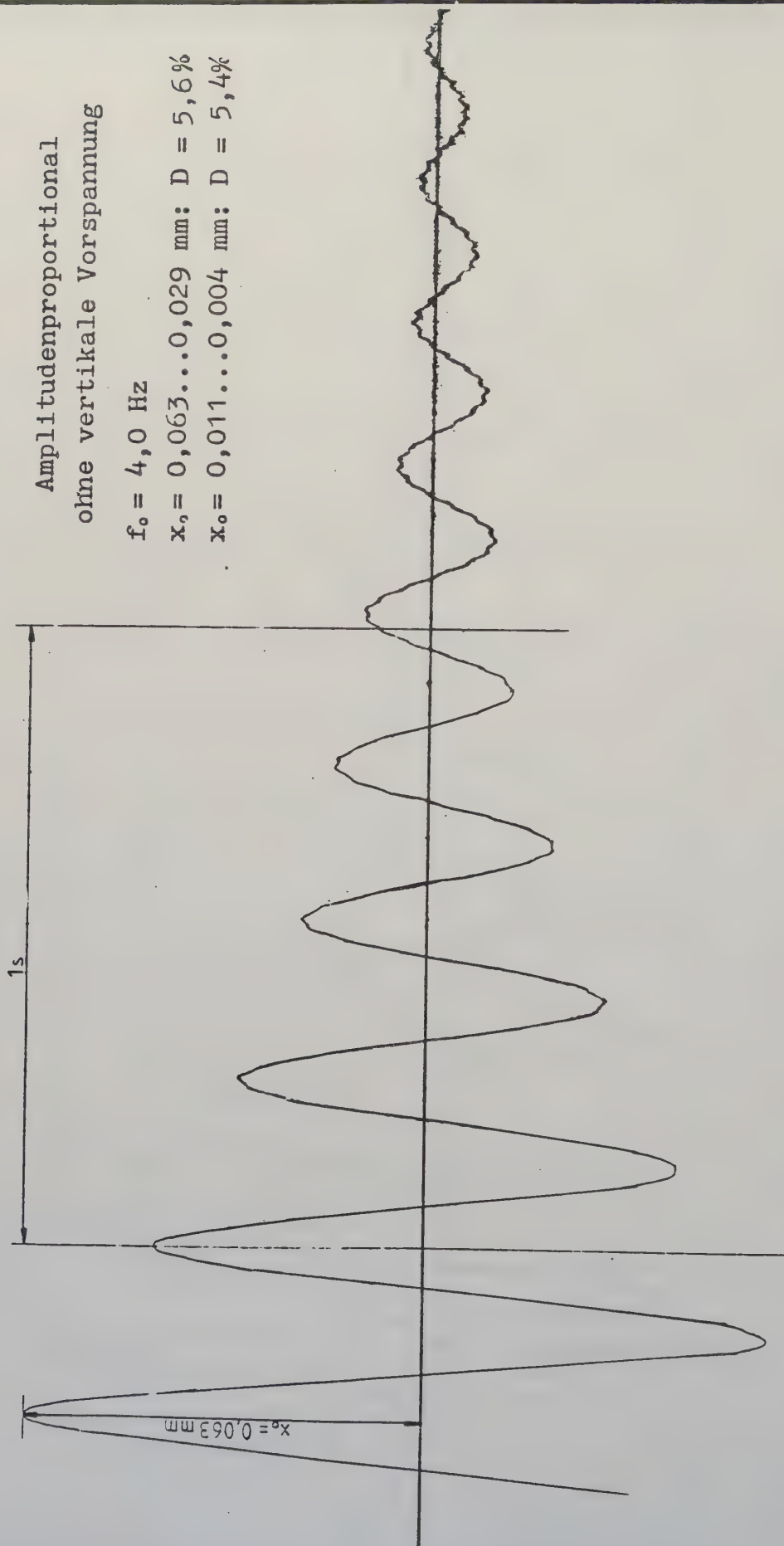
Meßpunkt: Mauermitte



Meßpunkt: Mauermitte



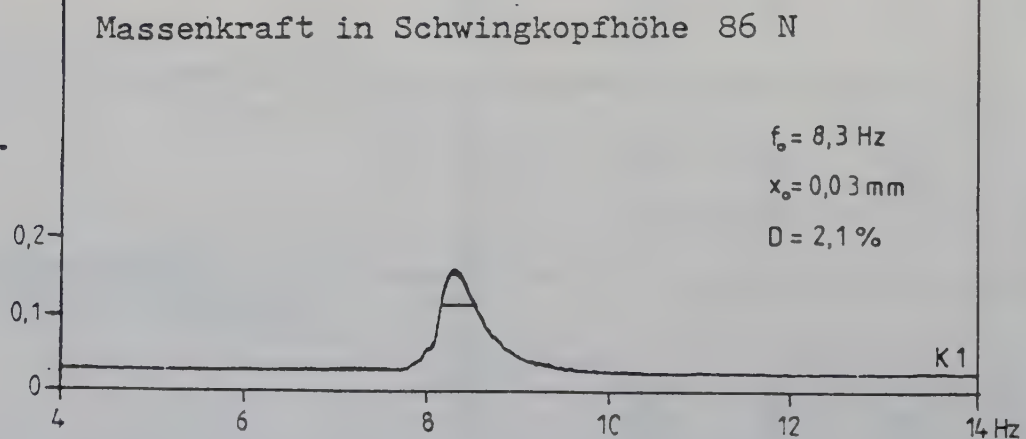
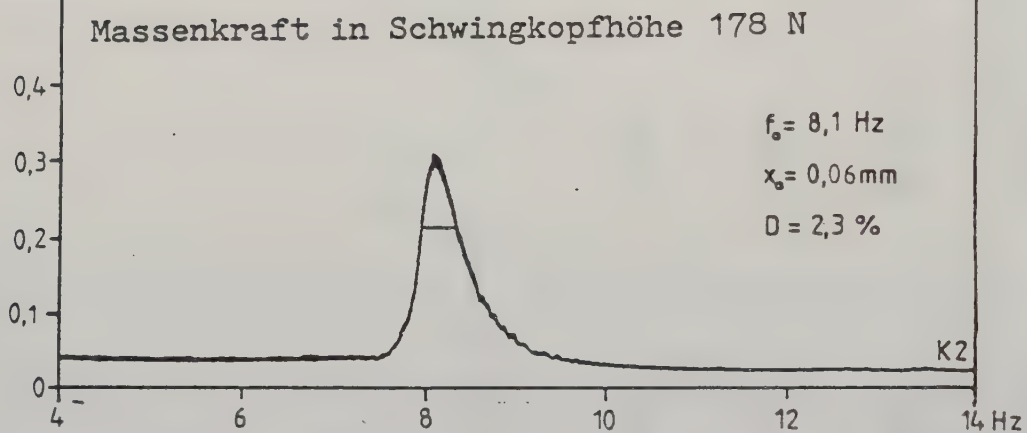
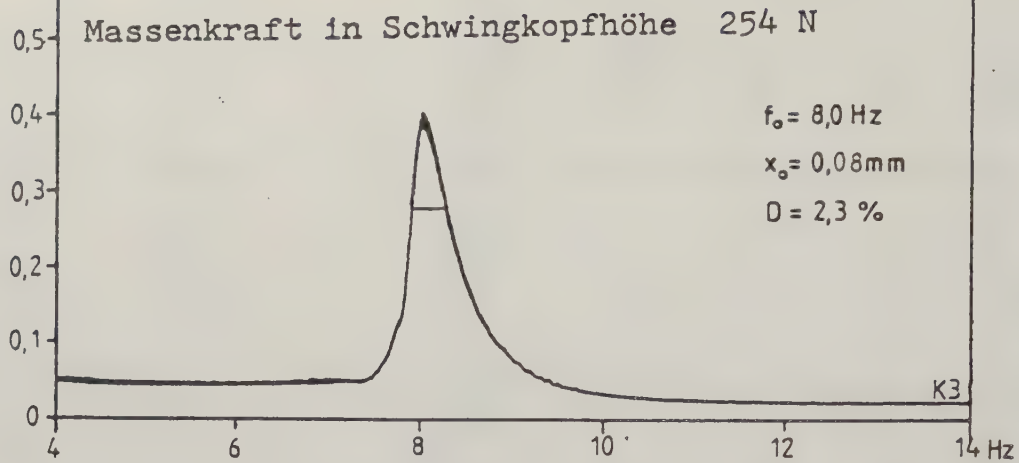
Meßpunkt: Mauermitte



| - 135 -                           |                 | 3.Kalksandsteinwand 11,5 cm (1.Vers.)<br>Wertetabelle<br>Anregung über Fundamentblock |                                       |                           | Prüfaufbau<br>Variante 1        |                                 |
|-----------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Massenkraft<br>Schwingkopf<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz)                                                                      | Mauermatte                            |                           | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|                                   |                 |                                                                                       | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                                 |                                 |
| 86                                | 2,1*            | 8,3                                                                                   | 0,082                                 | 0,156                     | -                               | 0,07                            |
| 178                               | 2,3*            | 8,1                                                                                   | 0,155                                 | 0,305                     | -                               | 0,14                            |
| 254                               | 2,3*            | 8,0                                                                                   | 0,202                                 | 0,402                     | -                               | 0,36                            |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve

Geschwindigkeit [cm/s]



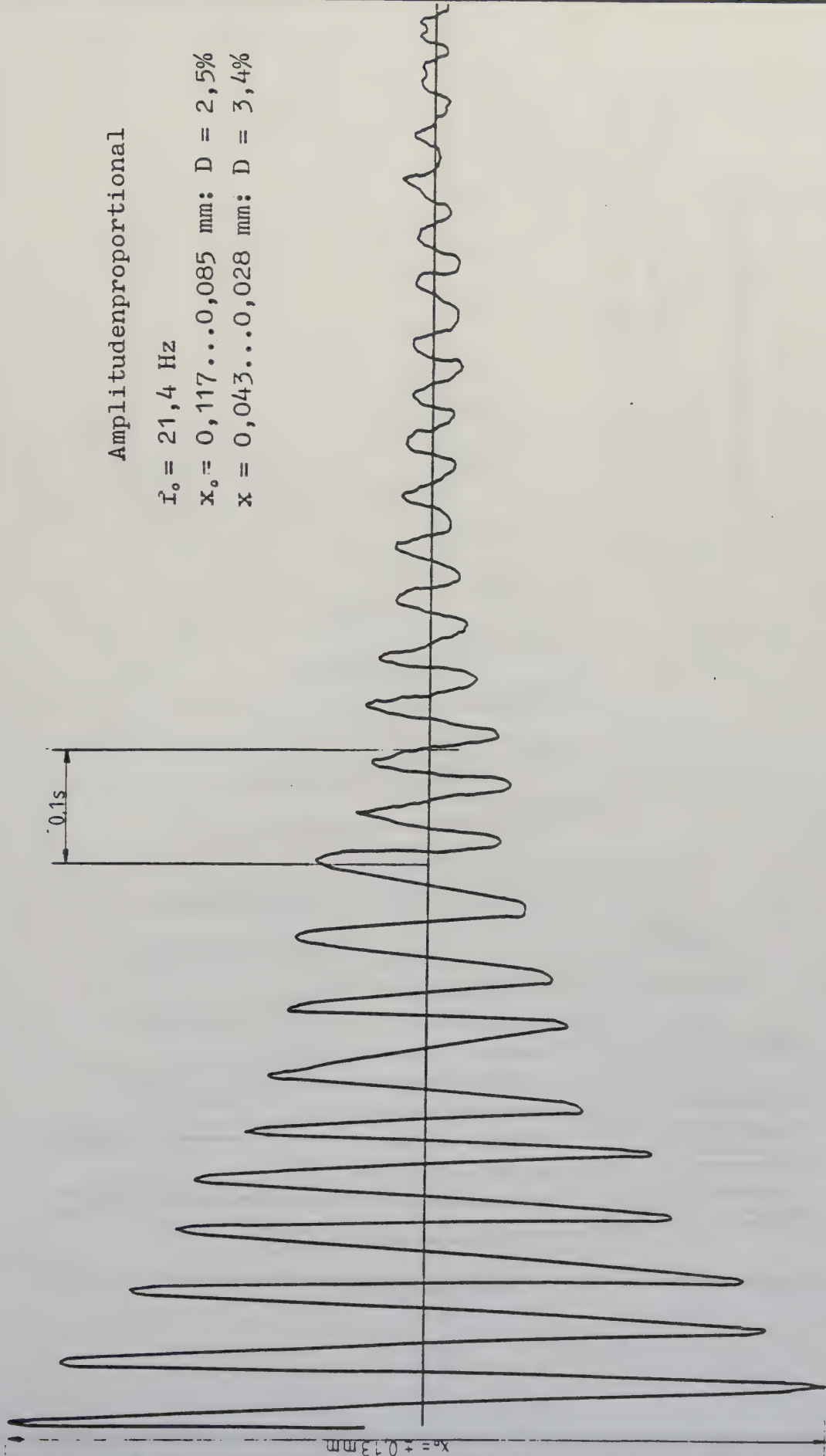
Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

$$f_0 = 21,4 \text{ Hz}$$

$$x_0 = 0,117 \dots 0,085 \text{ mm}; D = 2,5\%$$

$$x = 0,043 \dots 0,028 \text{ mm}; D = 3,4\%$$



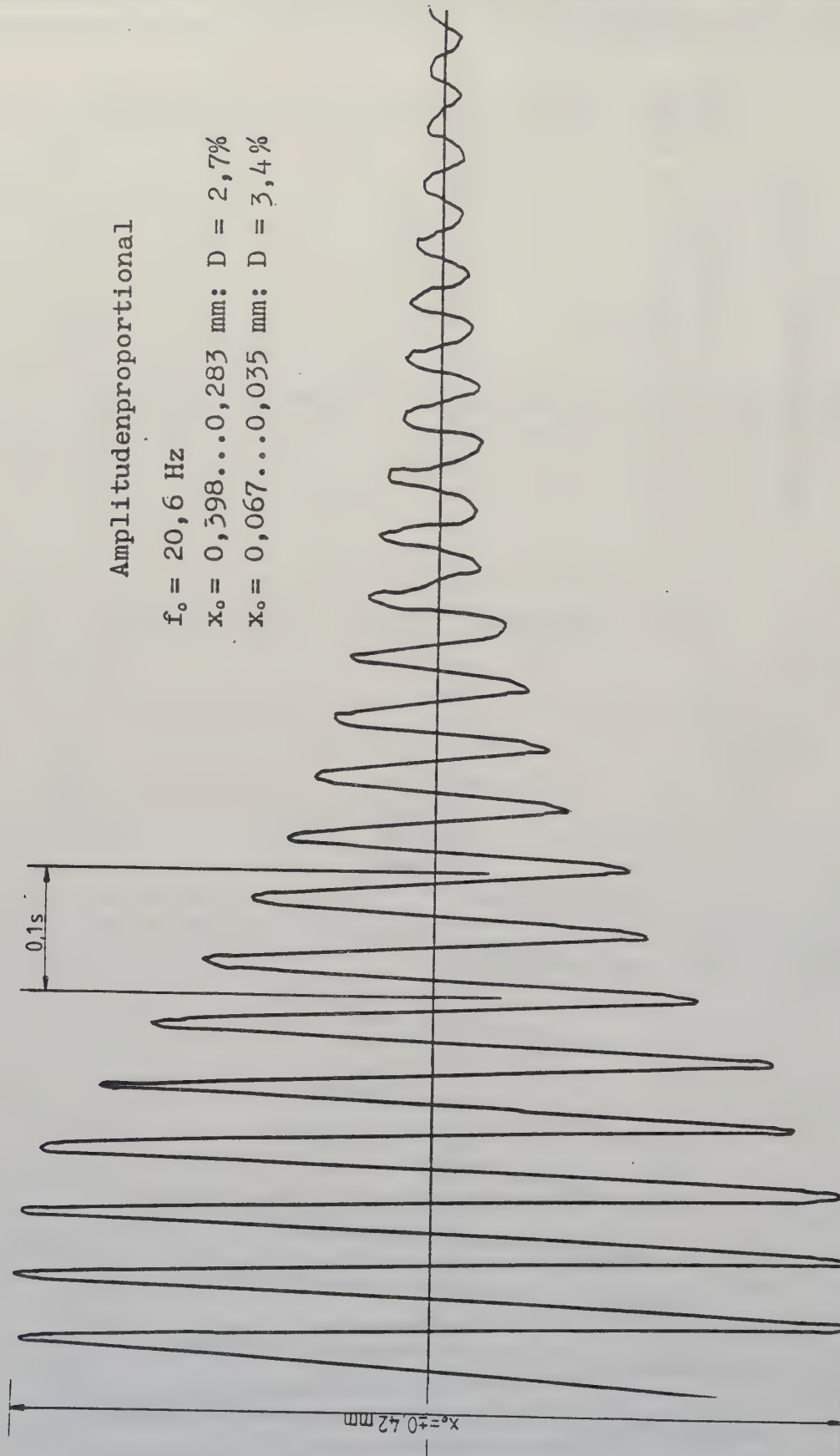
Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

$f_0 = 20,6 \text{ Hz}$

$x_0 = 0,398 \dots 0,283 \text{ mm}$ :  $D = 2,7\%$

$x_0 = 0,067 \dots 0,035 \text{ mm}$ :  $D = 3,4\%$



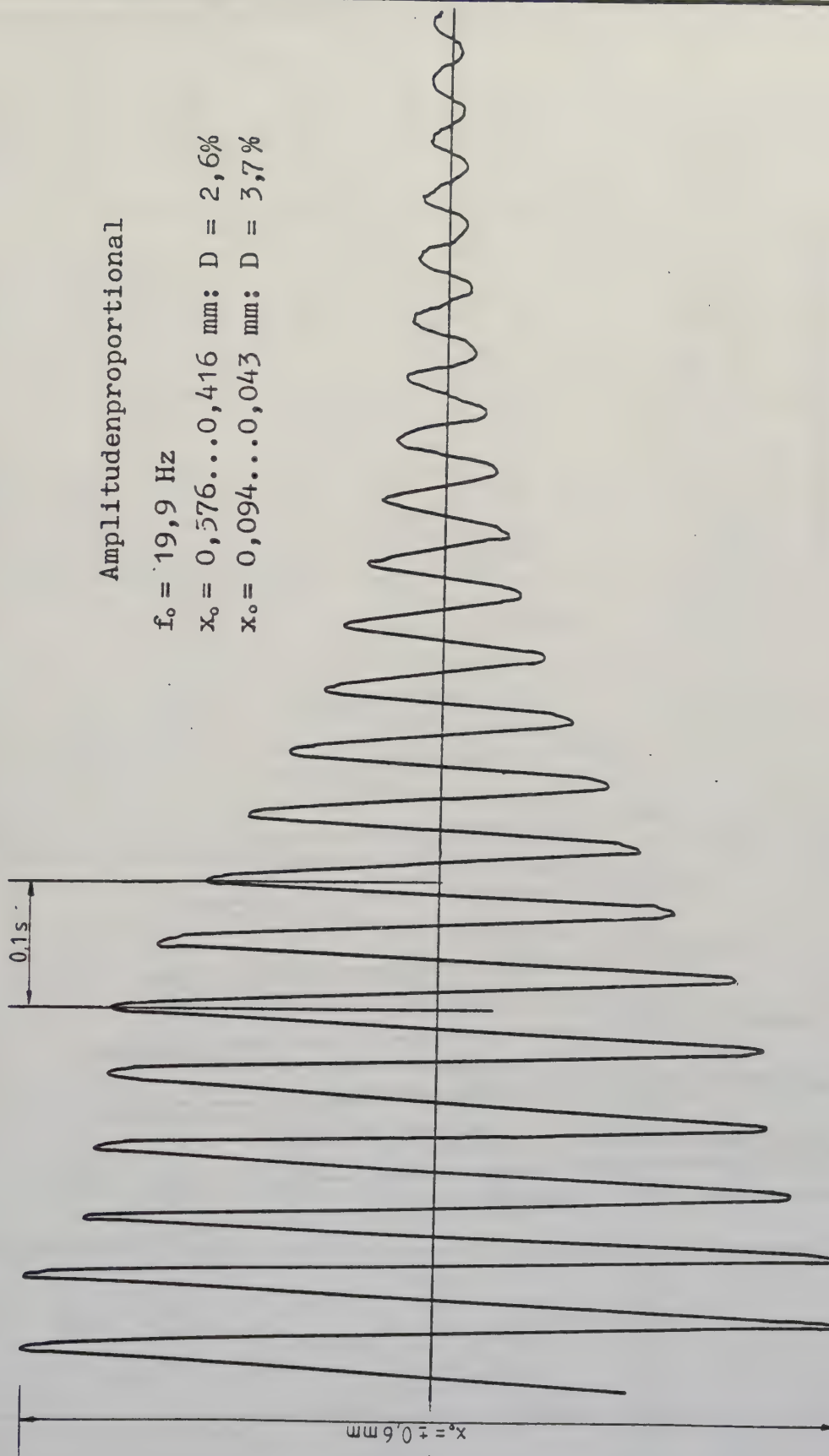
Meßpunkt: Mauermatte

Amplitudenproportional

$$f_0 = 19,9 \text{ Hz}$$

$$x_0 = 0,576 \dots 0,416 \text{ mm}; D = 2,6\%$$

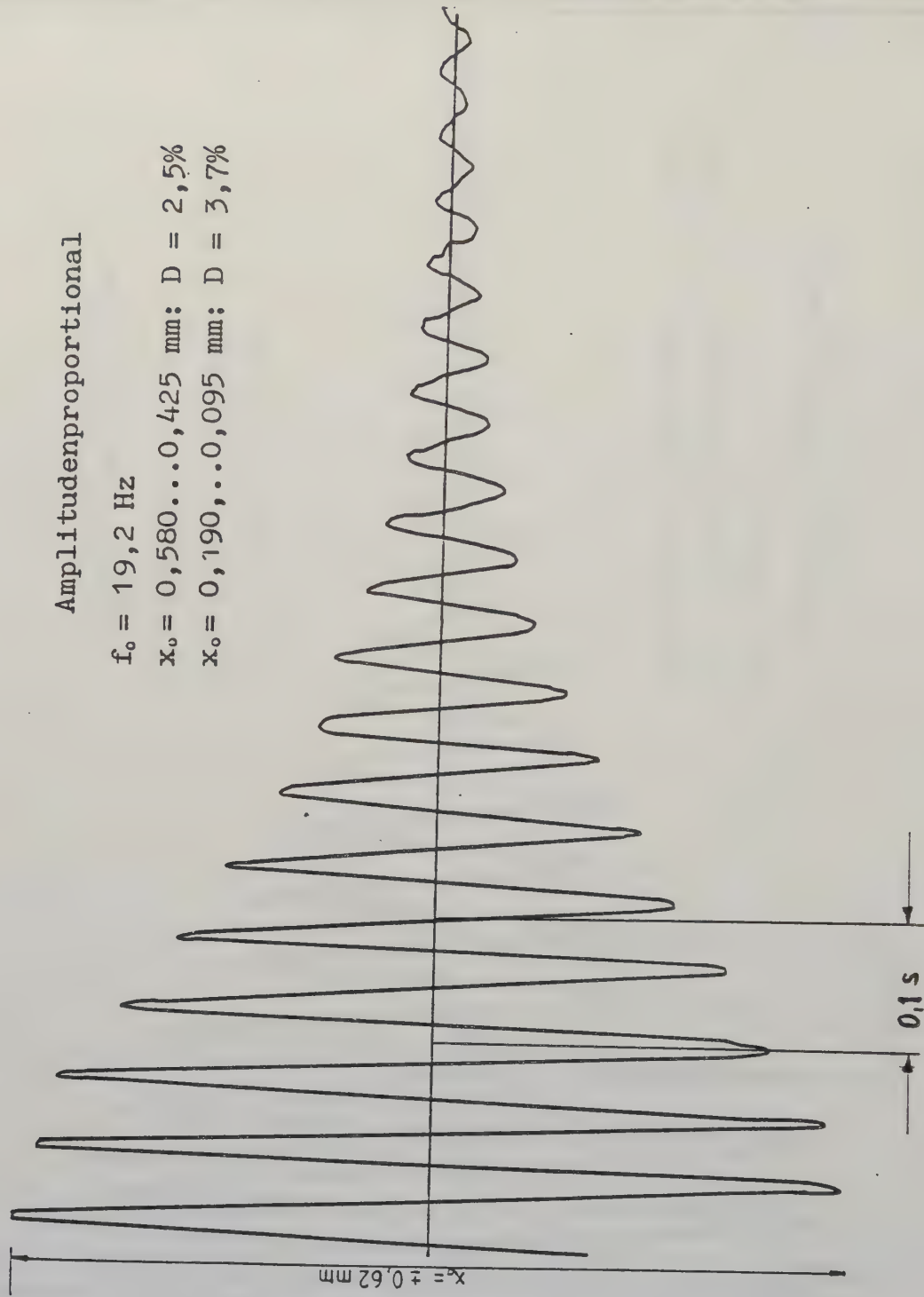
$$x_0 = 0,094 \dots 0,043 \text{ mm}; D = 3,7\%$$



Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

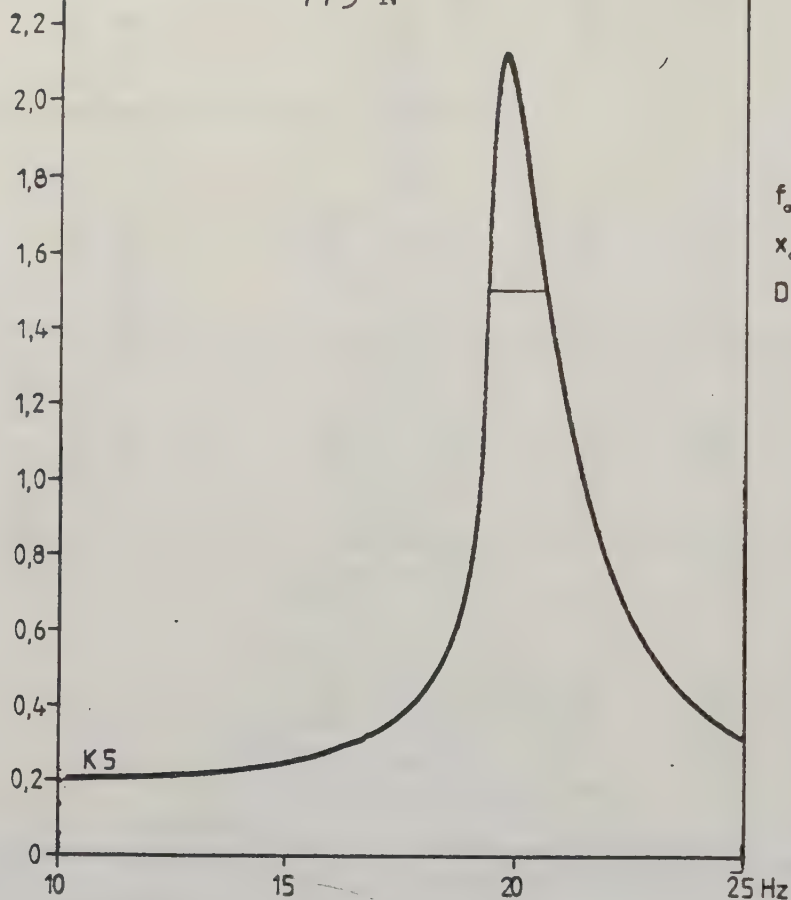
$f_0 = 19,2 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,580 \dots 0,425 \text{ mm}$ :  $D = 2,5\%$   
 $x_0 = 0,190 \dots 0,095 \text{ mm}$ :  $D = 3,7\%$





Geschwindigkeit [cm/s]

Massenkraft in Schwingkopfhöhe  
773 N

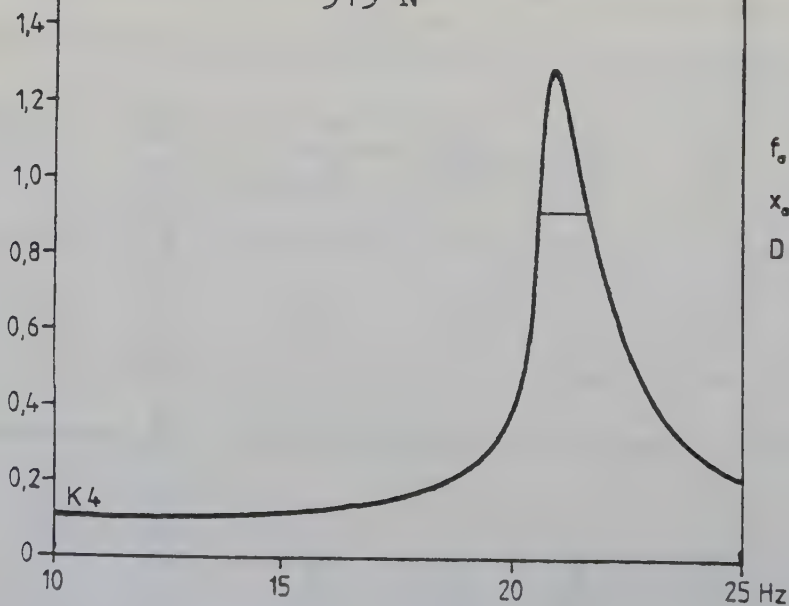


$f_0 = 19,8 \text{ Hz}$

$x_0 = 0,17 \text{ mm}$

$D = 3,1 \%$

Massenkraft in Schwingkopfhöhe  
515 N

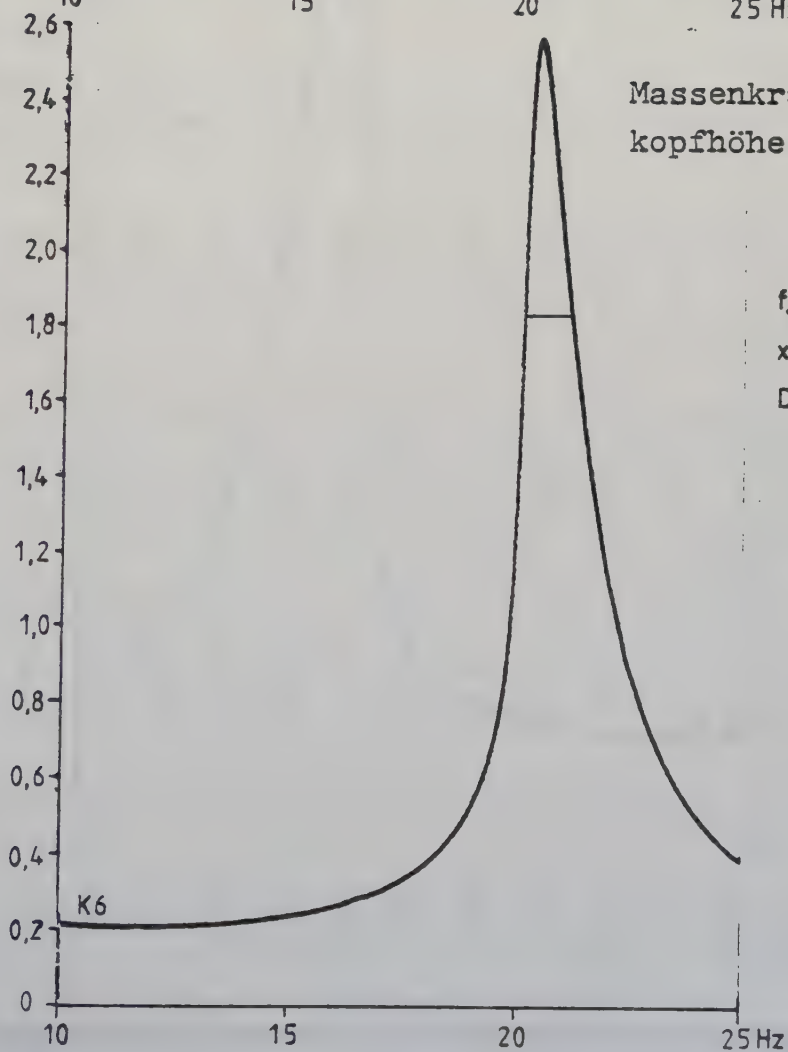
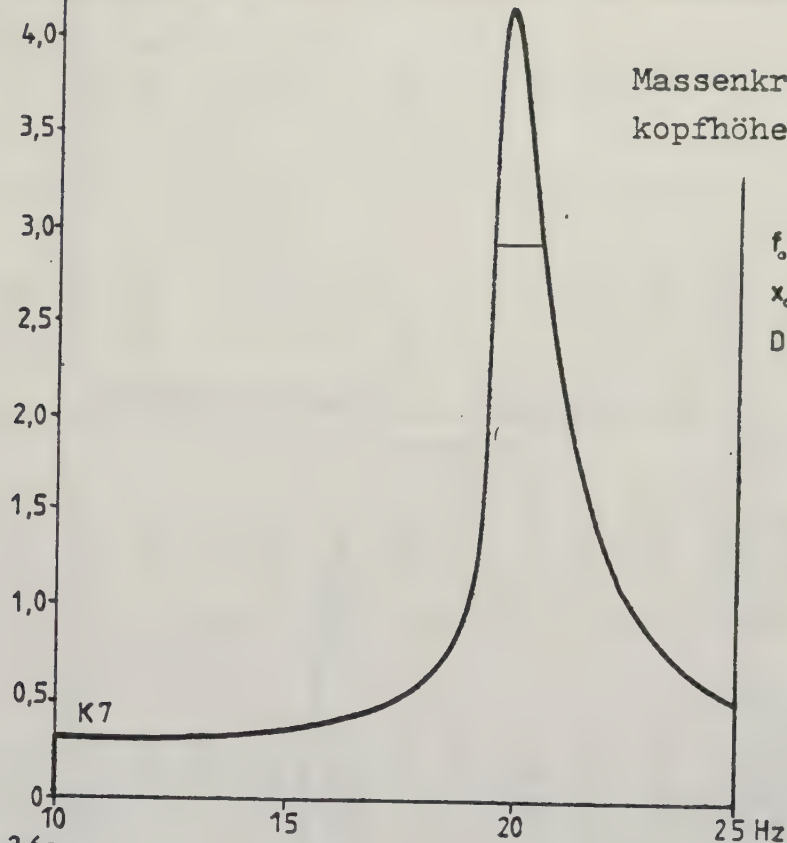


$f_0 = 20,9 \text{ Hz}$

$x_0 = 0,10 \text{ mm}$

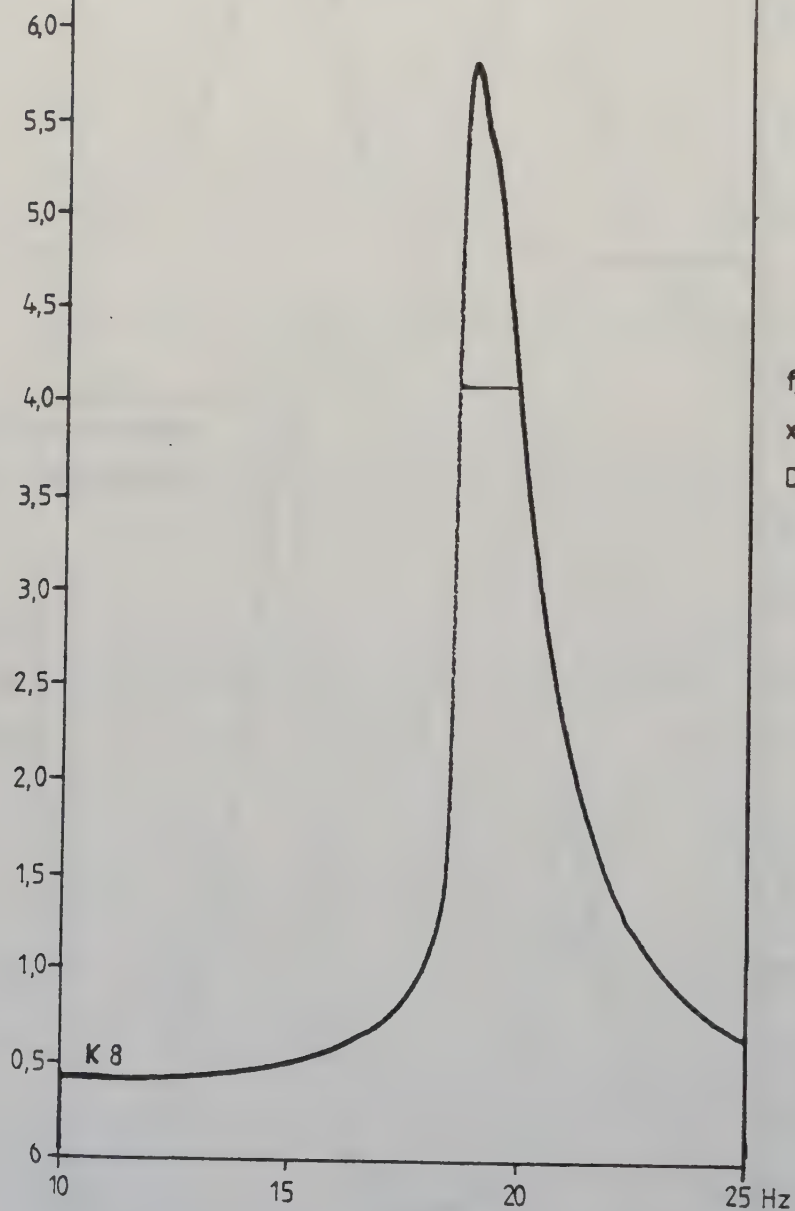
$D = 2,6 \%$

Geschwindigkeit [cm/s]



Geschwindigkeit [cm/s]

Massenkraft in Schwingkopfhöhe  
2060 N



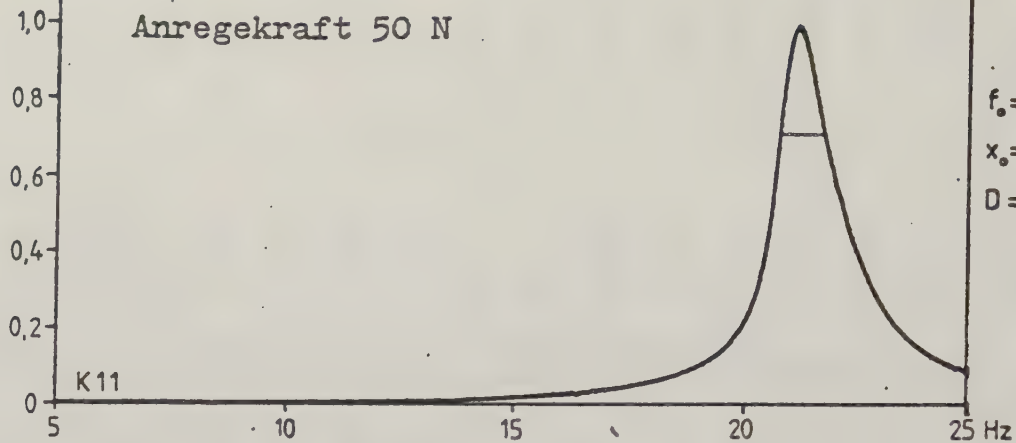
$f_0 = 18,9 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,49 \text{ mm}$   
 $D = 3,5 \%$

| - 145 -             |                 | H. Kalkschale einwand 41,3 cm (4. Vers.)<br>Wertetabelle<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                                       |                           | Prüfprot. n.<br>Variante 2      |                                 |
|---------------------|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Anregerkraft<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermatte                                                                                     |                                       |                           | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|                     |                 | Frequenz<br>(Hz)                                                                               | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm)               |                                 |
| 20                  | 2,0*            | 21,8                                                                                           | 0,563                                 | 0,411                     | 0,03                            | 0,04                            |
| 30                  | 2,1*            | 21,6                                                                                           | 0,737                                 | 0,543                     | 0,04                            | 0,06                            |
| 50                  | 2,4*            | 21,2                                                                                           | 1,242                                 | 0,932                     | 0,07                            | 0,10                            |
| 70                  | 2,4*            | 21,1                                                                                           | 1,933                                 | 1,458                     | 0,11                            | 0,15                            |
| 100                 | 2,6*            | 20,7                                                                                           | 2,707                                 | 2,081                     | 0,16                            | 0,22                            |
| 150                 | (2,3)           | 18,7                                                                                           | 4,280                                 | 3,642                     | 0,31                            | 0,33                            |
| 200                 | (1,9)           | 17,9                                                                                           | 6,198                                 | 5,511                     | 0,49                            | 0,51                            |
| 300                 | (2,8)           | 16,6                                                                                           | 7,724                                 | 7,405                     | 0,71                            | 0,65                            |
| 400                 | (2,3)           | 13,3                                                                                           | 11,313                                | 13,538                    | 1,62                            | 1,11                            |
| 500                 | (3,2)           | 12,5                                                                                           | 12,090                                | 15,394                    | 1,96                            | 1,15                            |
| 600                 | (4,3)           | 12,0                                                                                           | 12,507                                | 16,588                    | 2,20                            | 1,24                            |
| 750                 | (6,2)           | 10,8                                                                                           | 13,031                                | 19,204                    | 2,83                            | 1,42                            |
| 1000                | (9,2)           | 10,3                                                                                           | 14,240                                | 22,004                    | 3,40                            | 1,55                            |
| 1500                | (10,4)          | 9,2                                                                                            | 20,049                                | 34,683                    | 6,00                            | 2,54                            |
| 2000                | (18,4)          | 5,1                                                                                            | 20,126                                | 62,807                    | 19,60                           | 6,20                            |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve  
 ( ): ausgerechneter Wert;  $K_{4/5} = 2315 \text{ kg}$

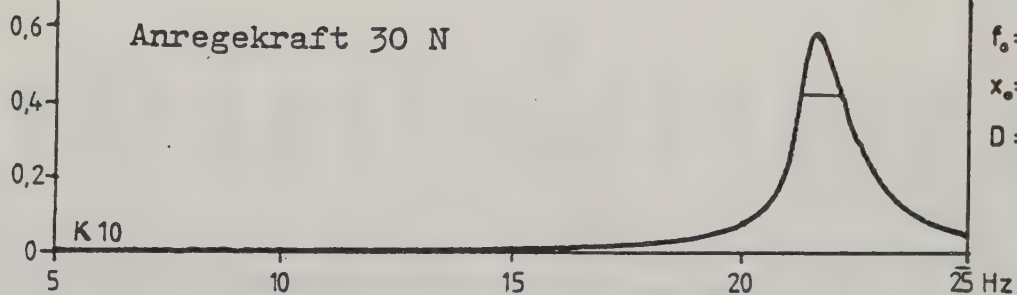
Geschwindigkeit [cm/s]

Anregekraft 50 N



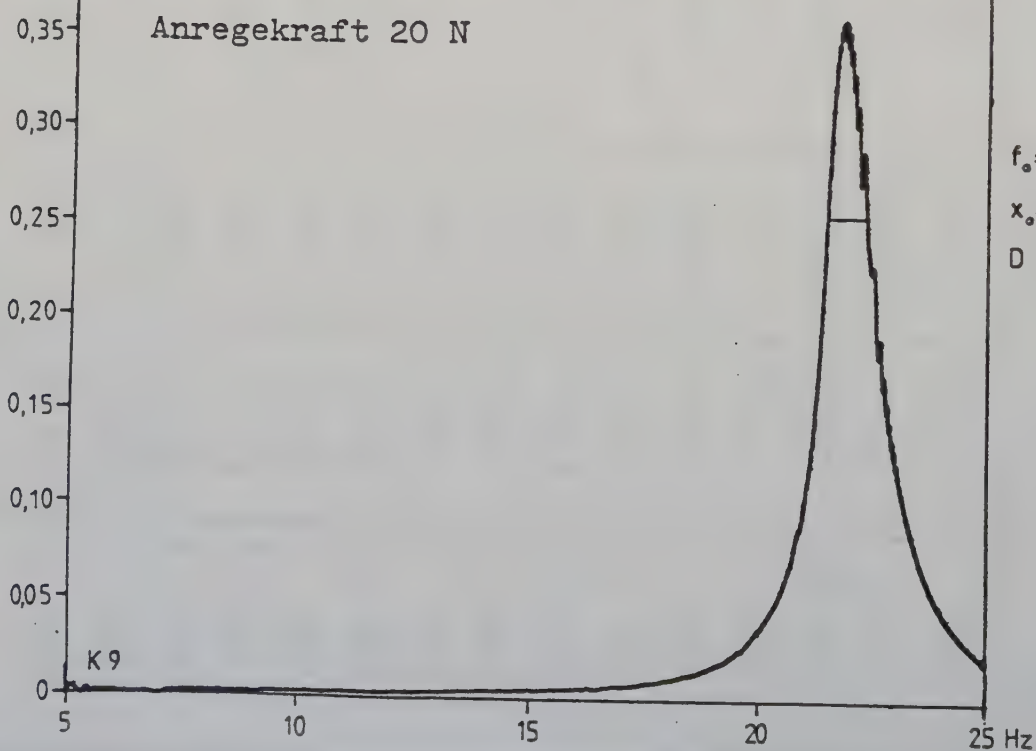
$f_0 = 21,2 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,07 \text{ mm}$   
 $D = 2,4 \%$

Anregekraft 30 N



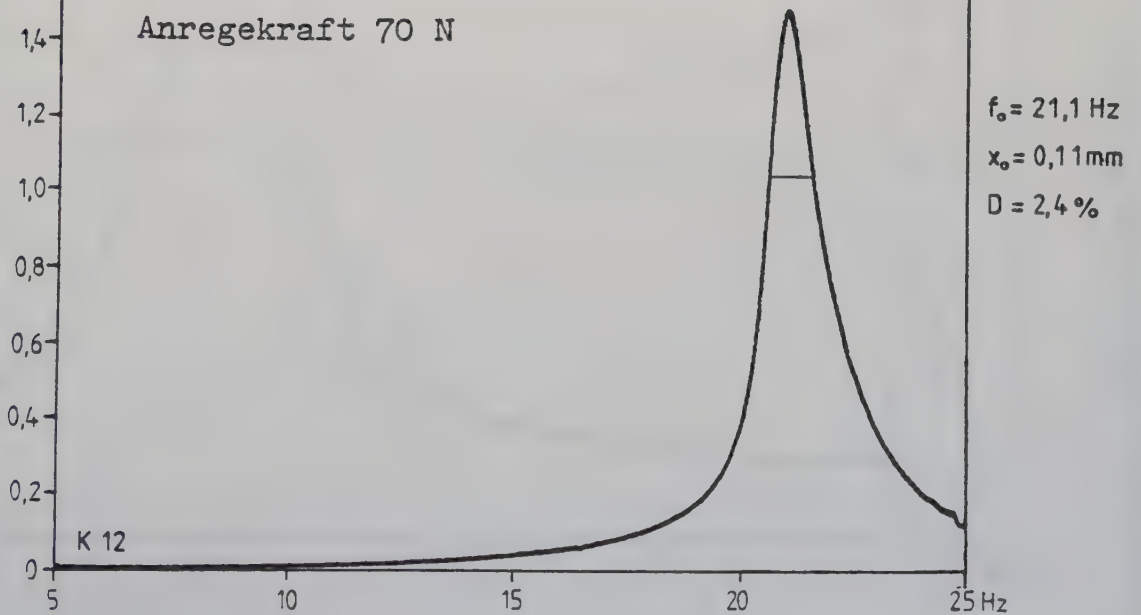
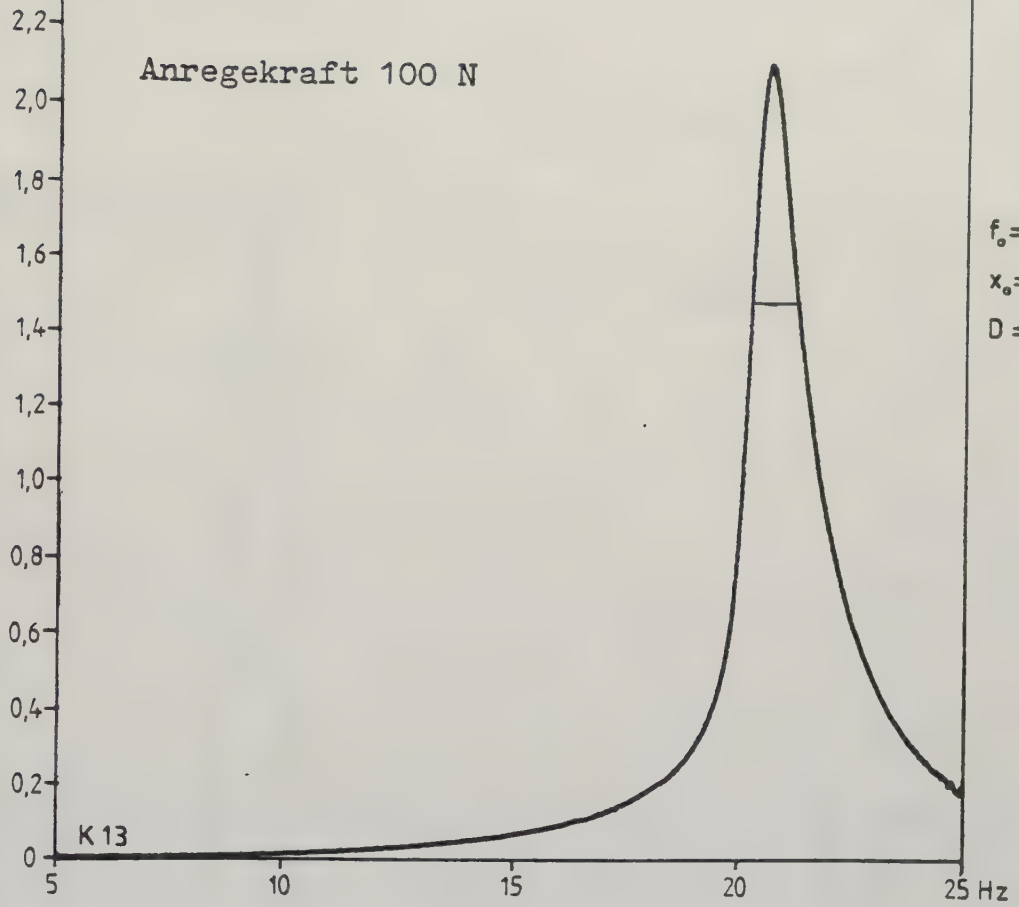
$f_0 = 21,6 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,04 \text{ mm}$   
 $D = 2,1 \%$

Anregekraft 20 N

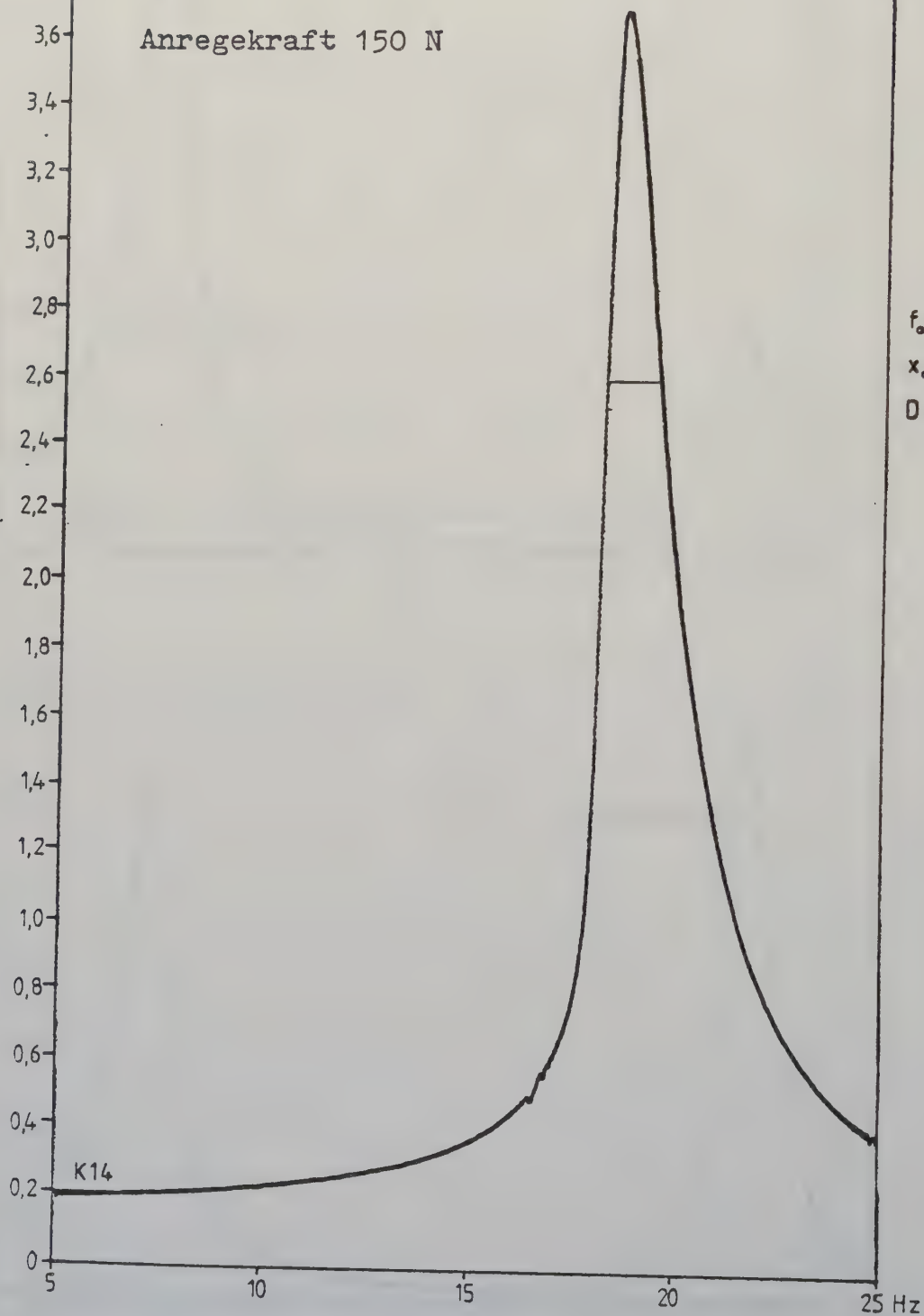


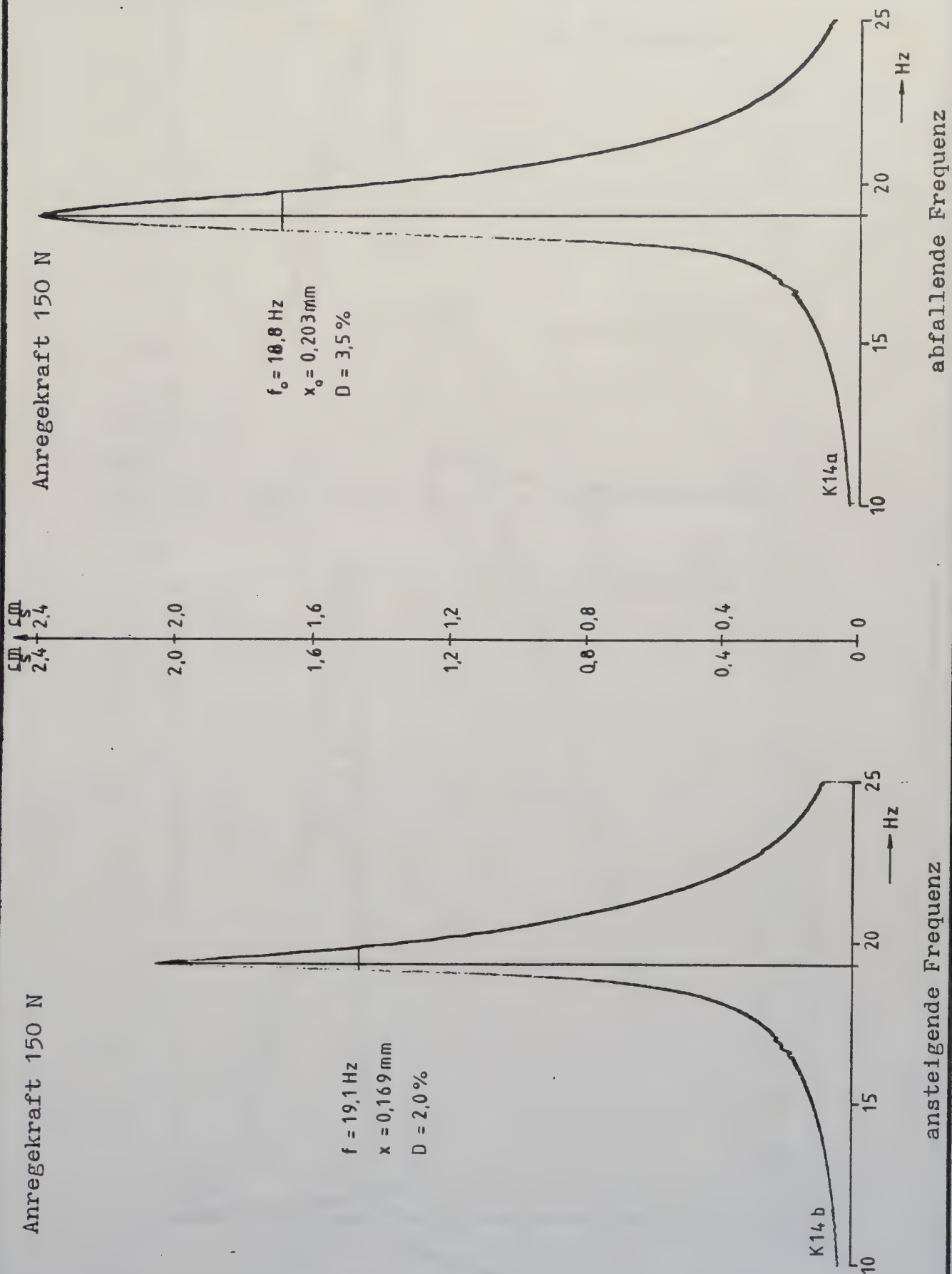
$f_0 = 21,8 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,03 \text{ mm}$   
 $D = 2,0 \%$

Geschwindigkeit [cm/s]

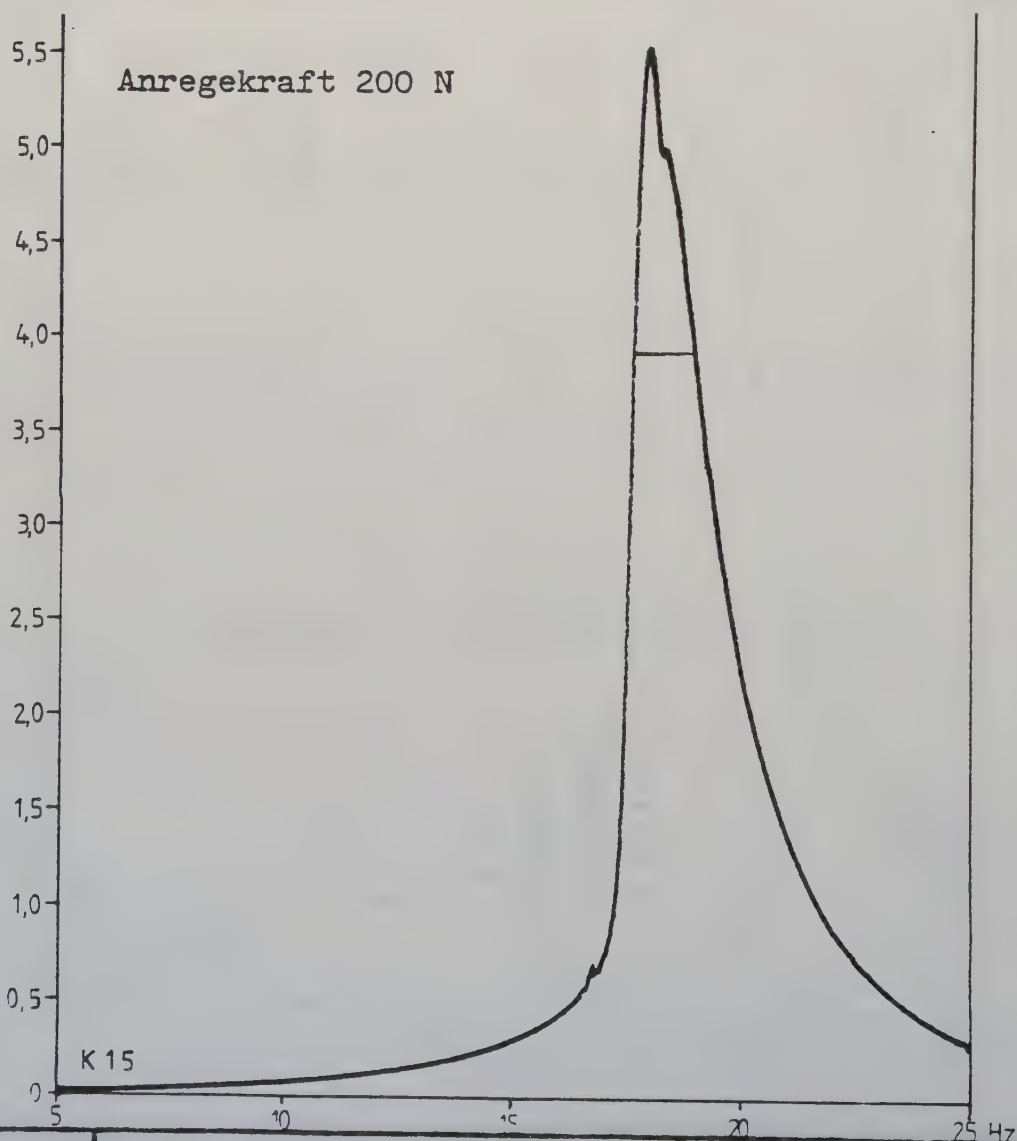
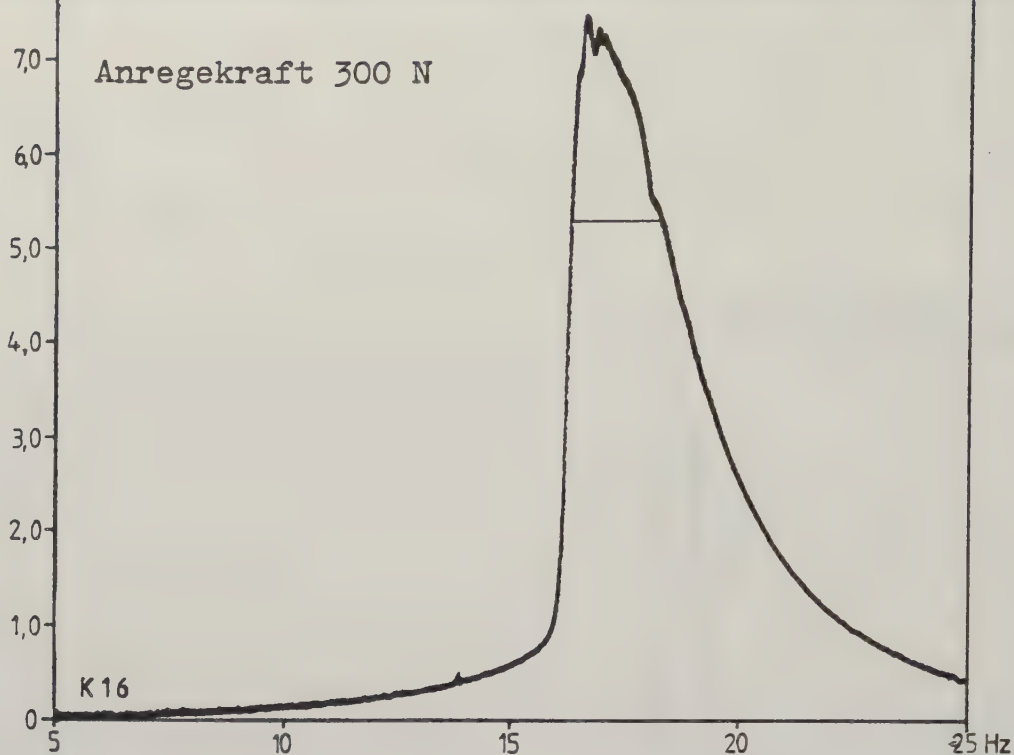


Geschwindigkeit (cm/s)

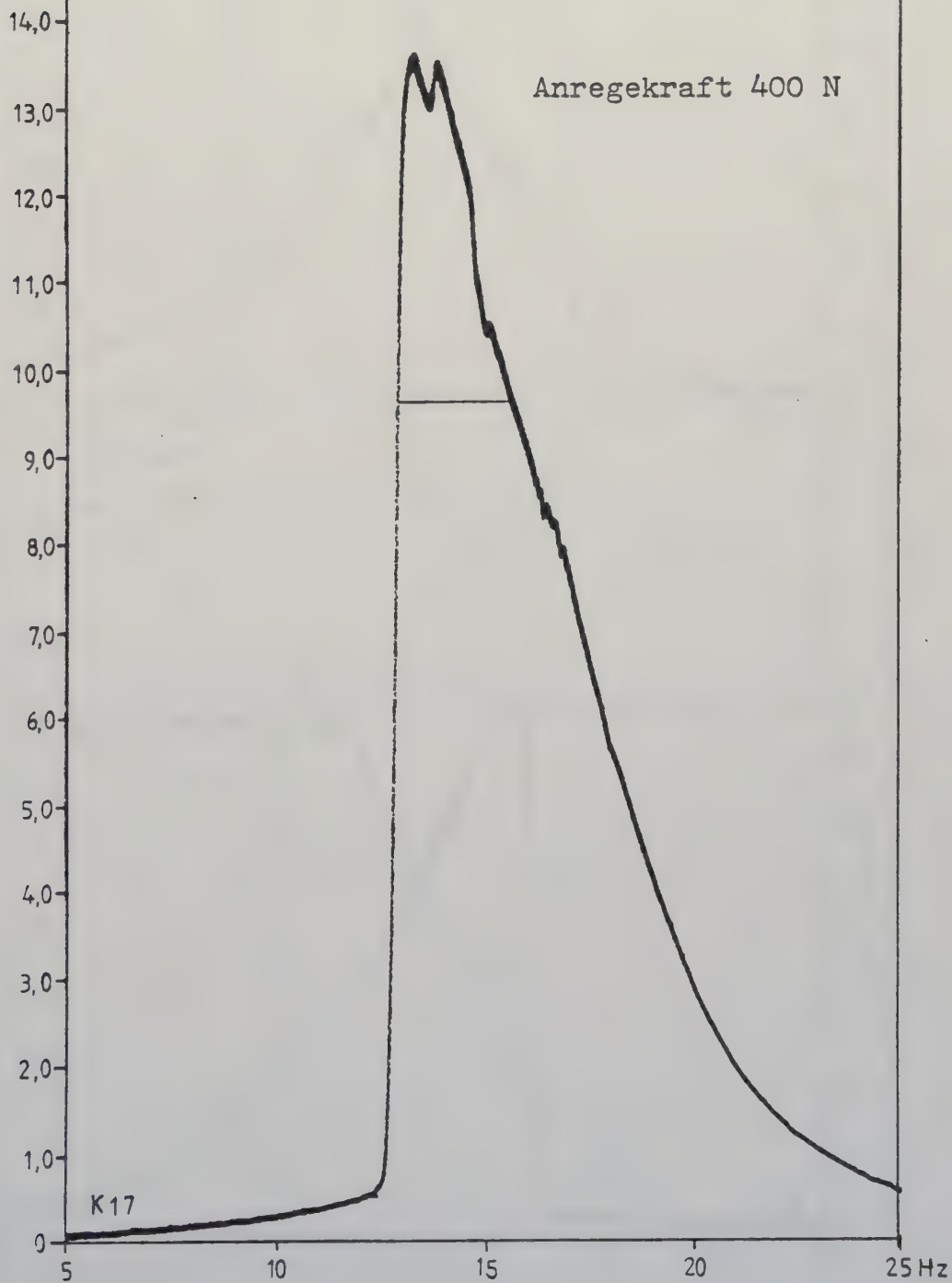




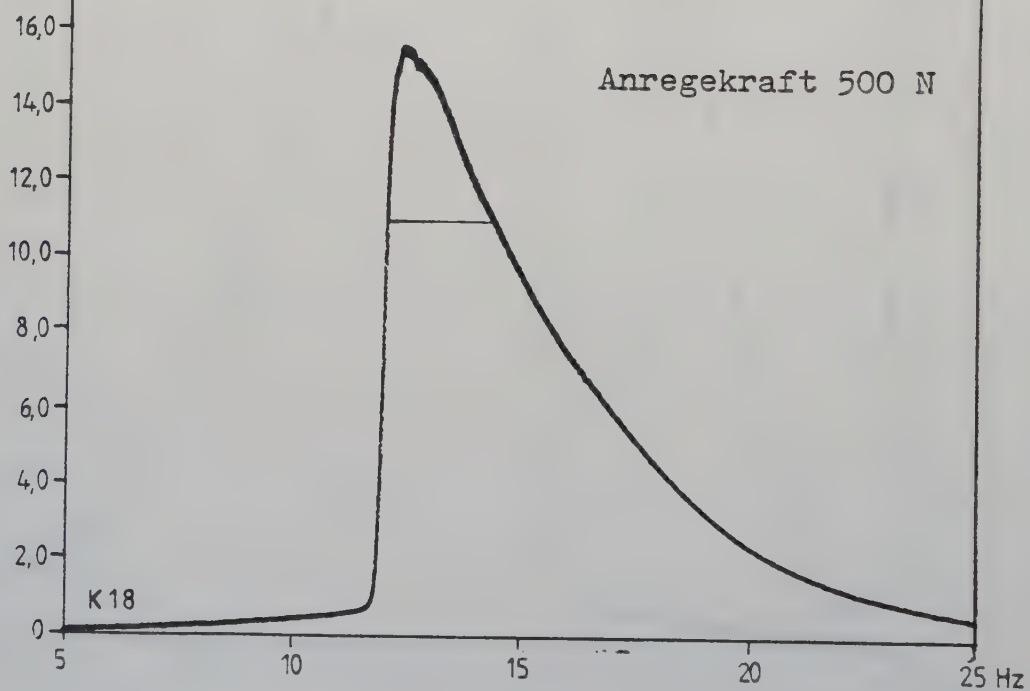
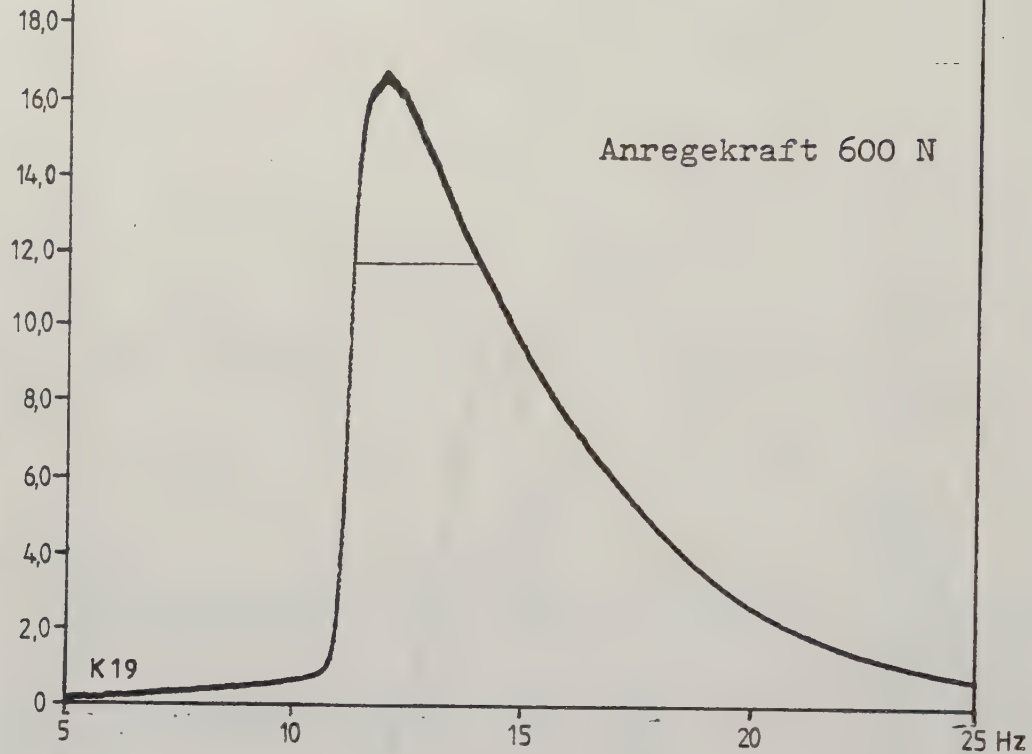
Geschwindigkeit [cm/s]



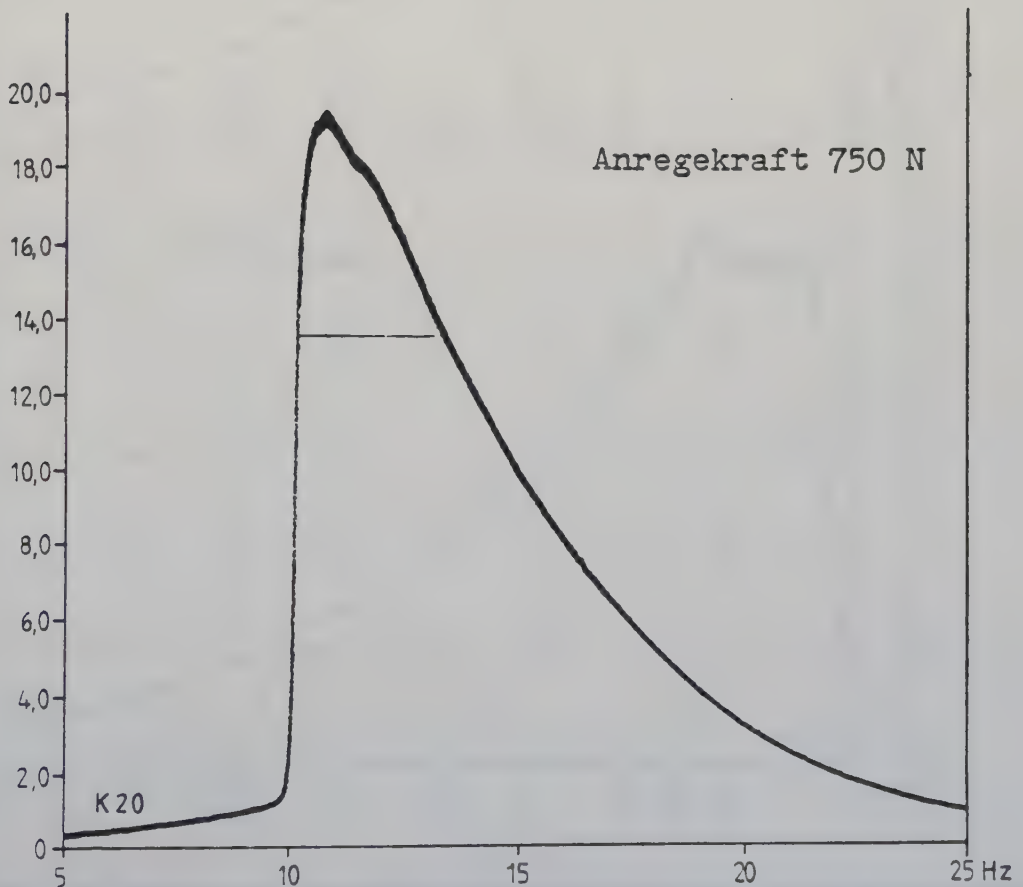
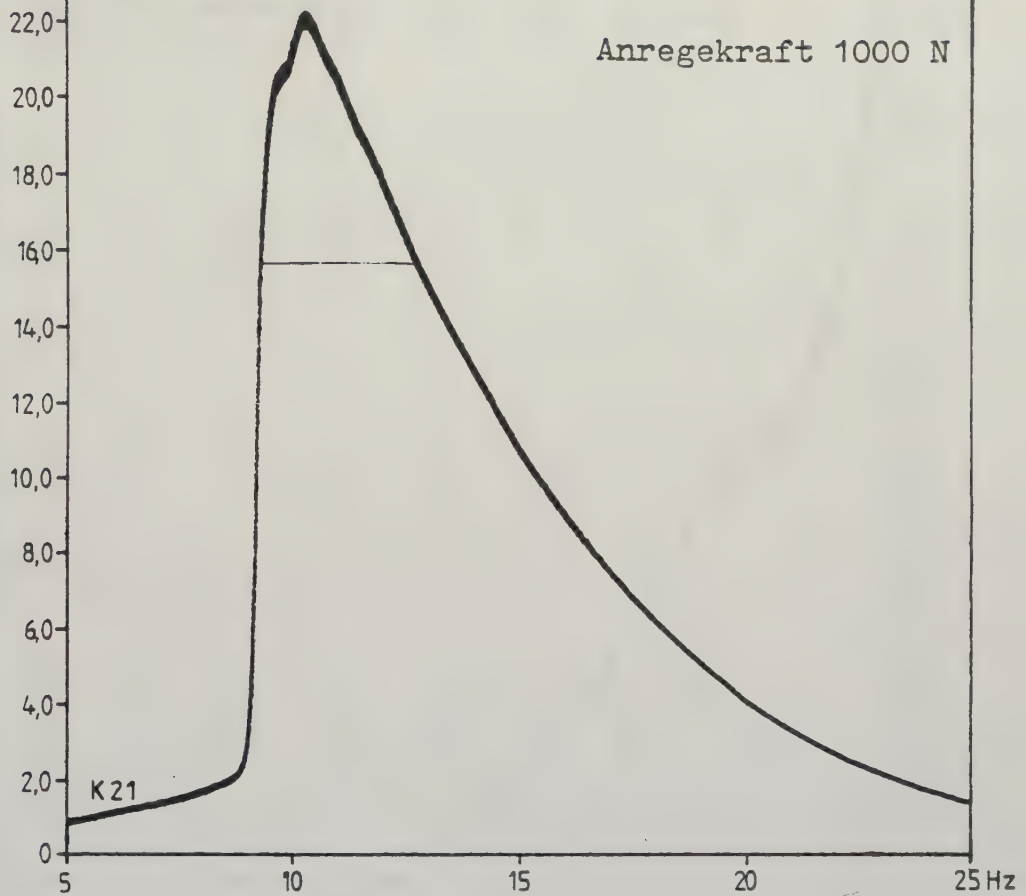
Geschwindigkeit [cm/s]



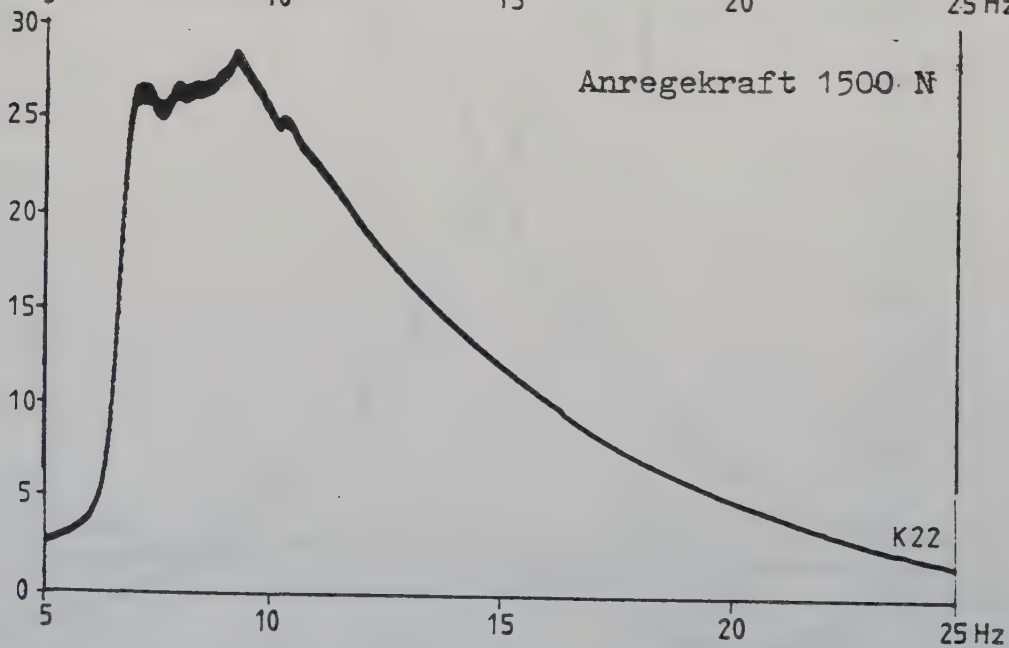
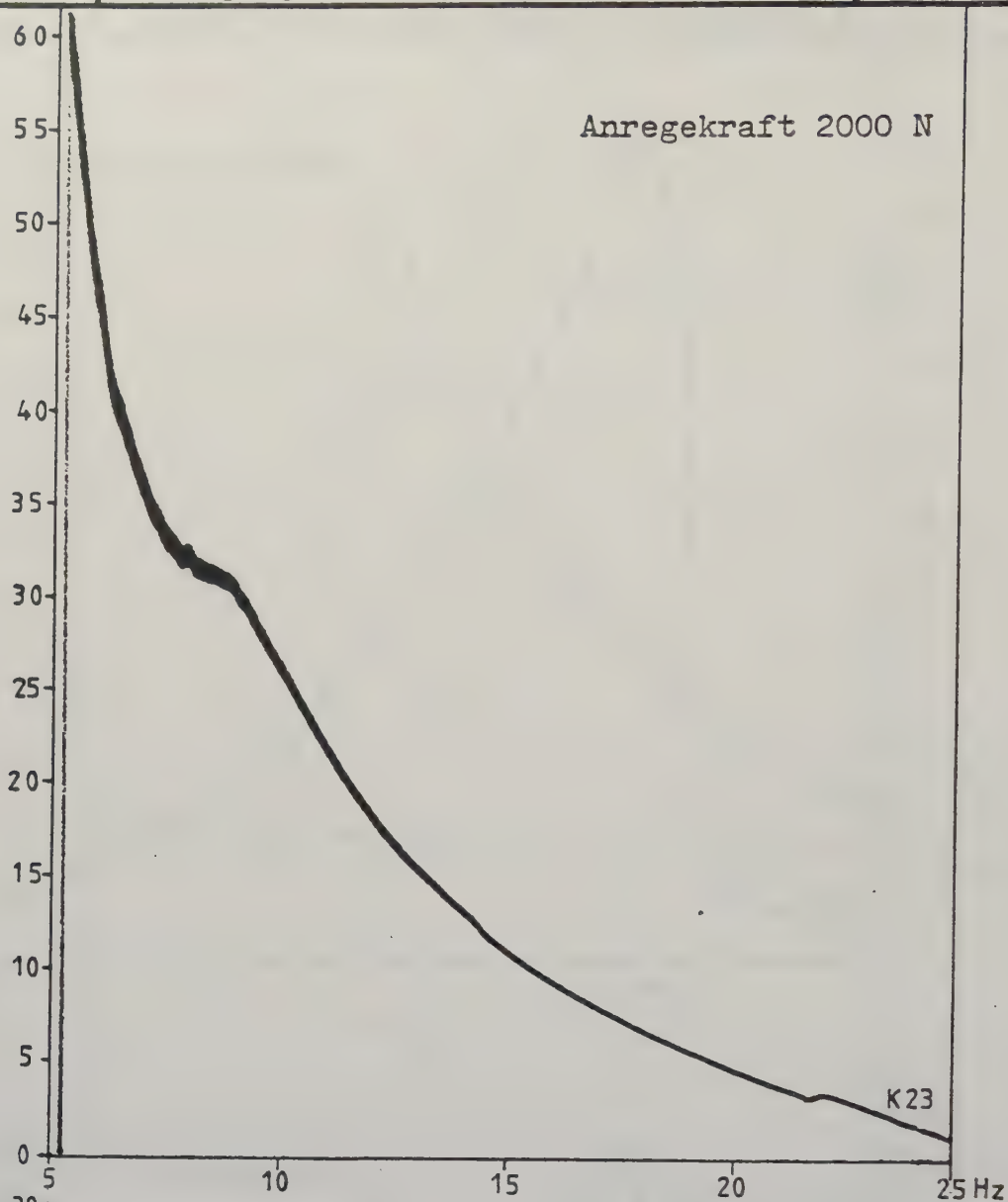
Geschwindigkeit [cm/s]



Geschwindigkeit [cm/s]

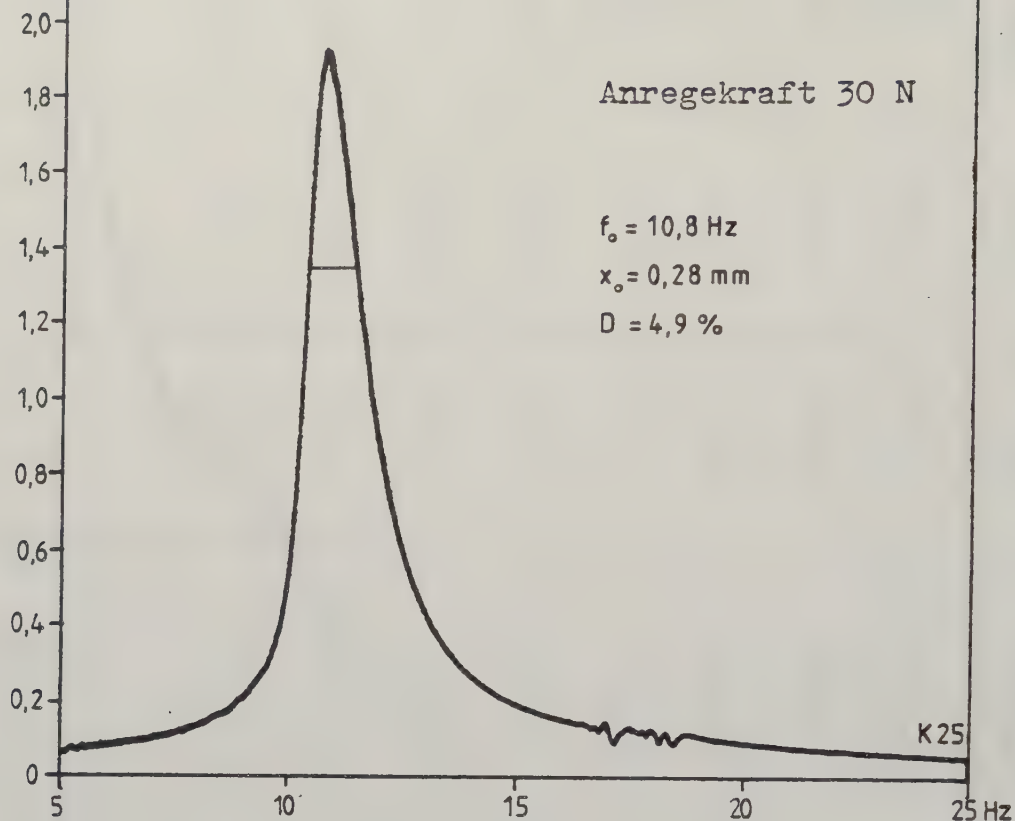


Geschwindigkeit (cm/s)

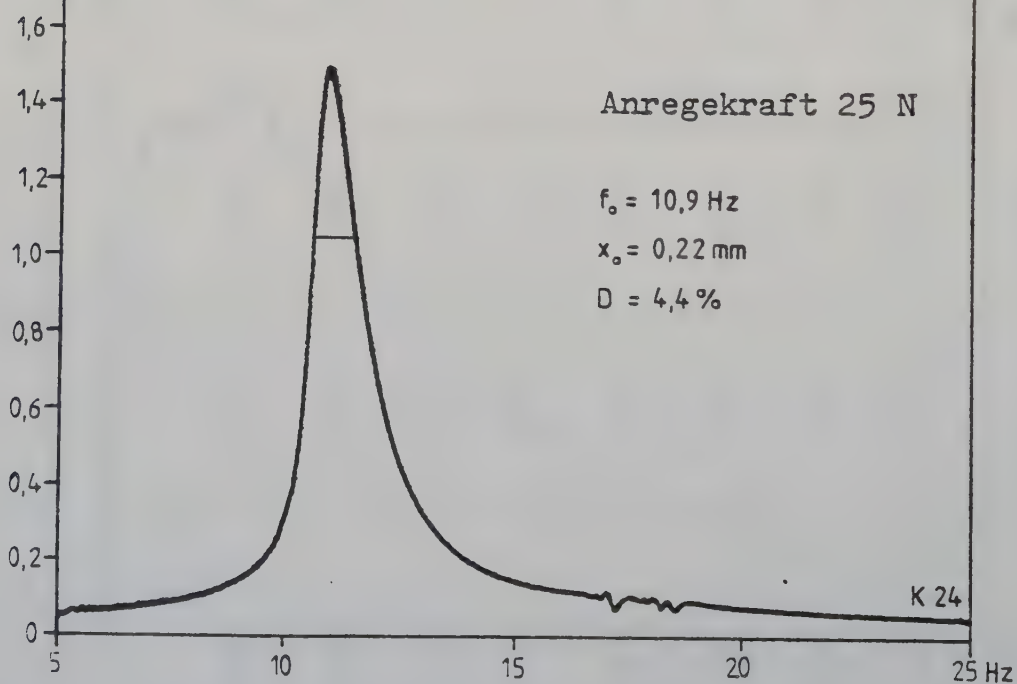




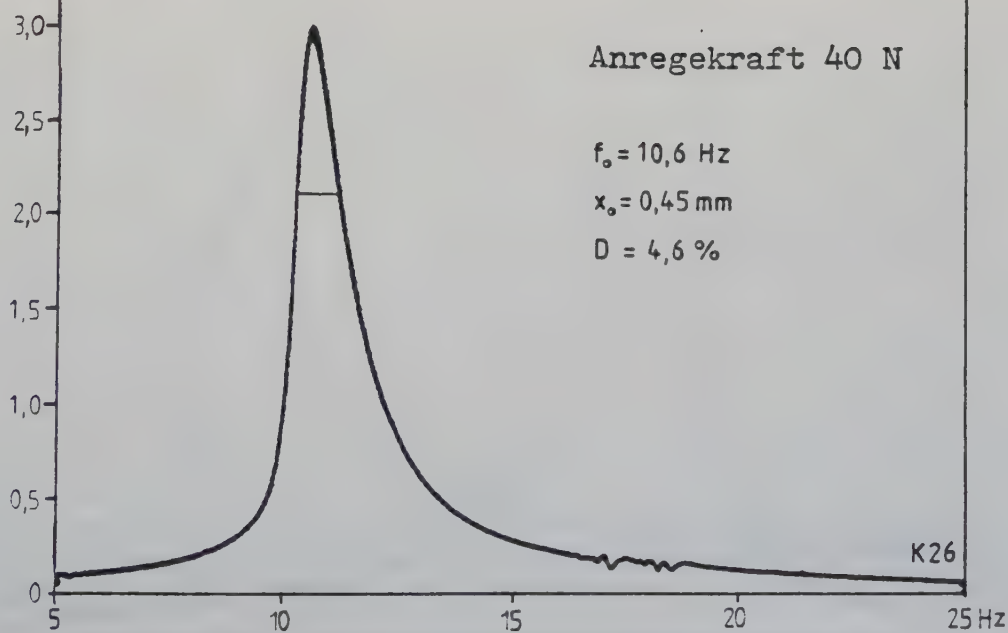
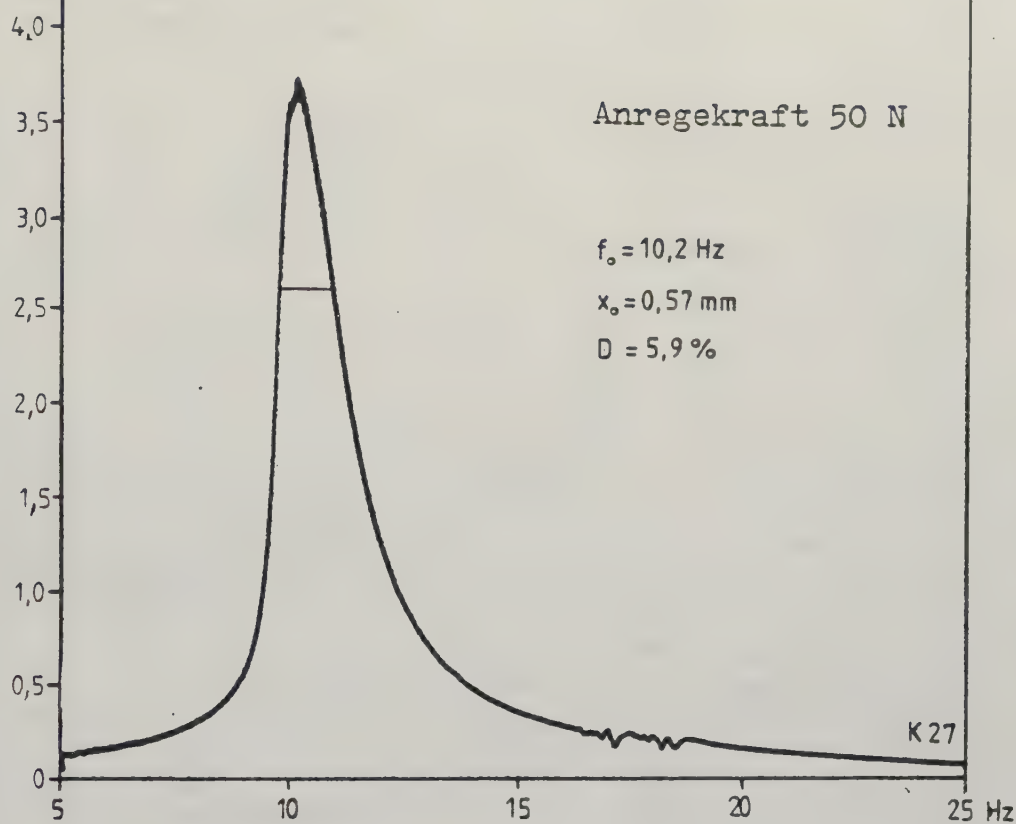
Geschwindigkeit [cm/s]



Wiederholung mit bereits gerissener Mauer

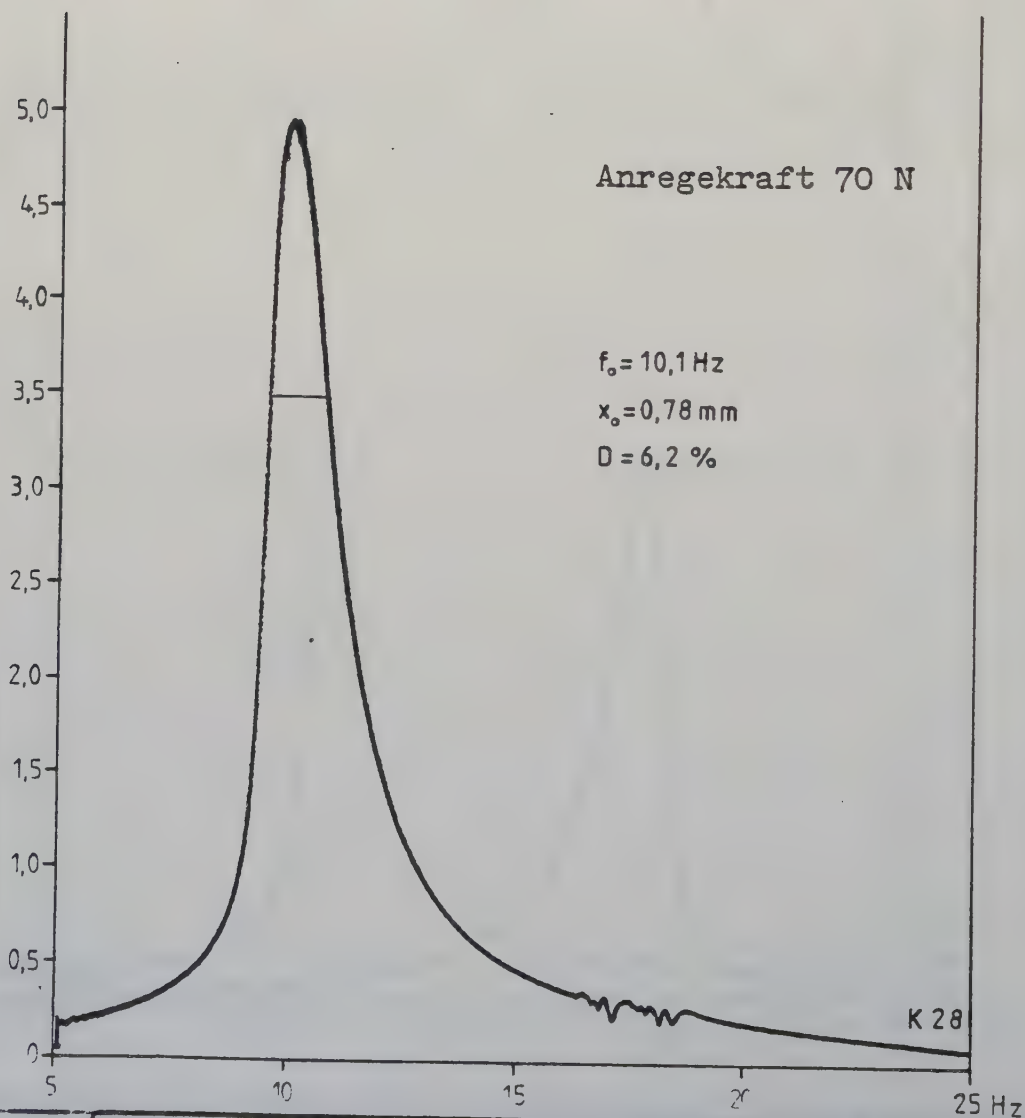
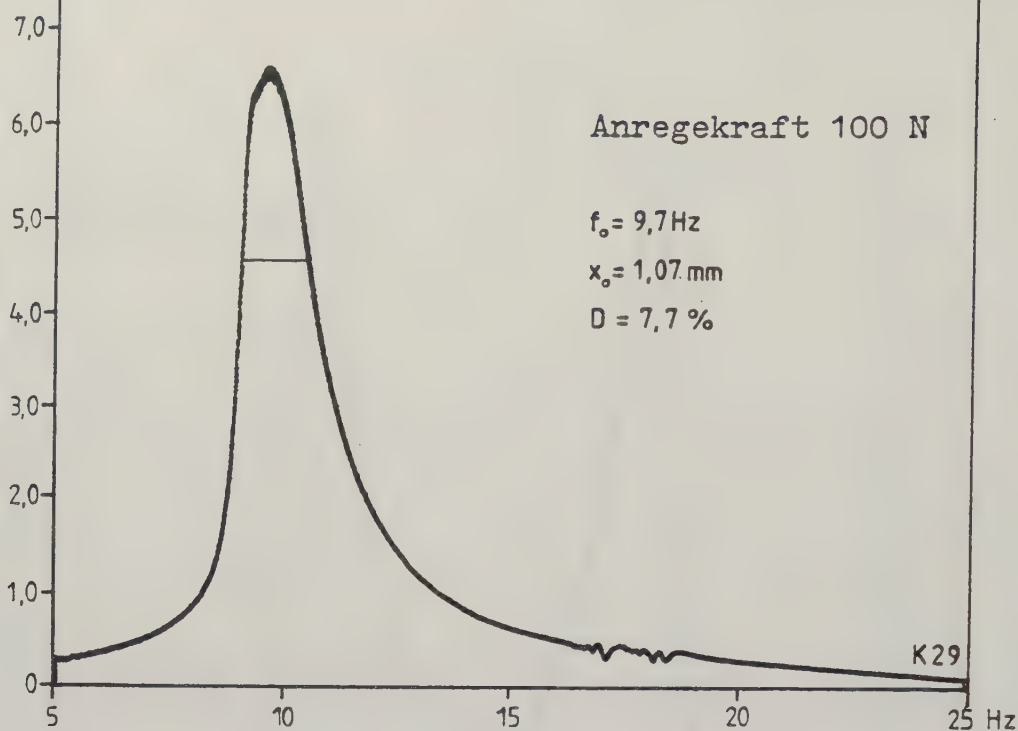


Geschwindigkeit [cm/s]



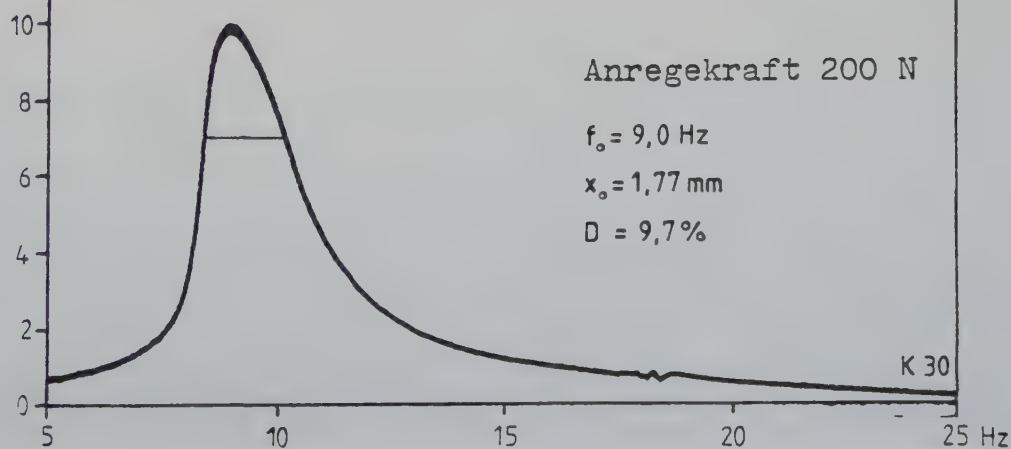
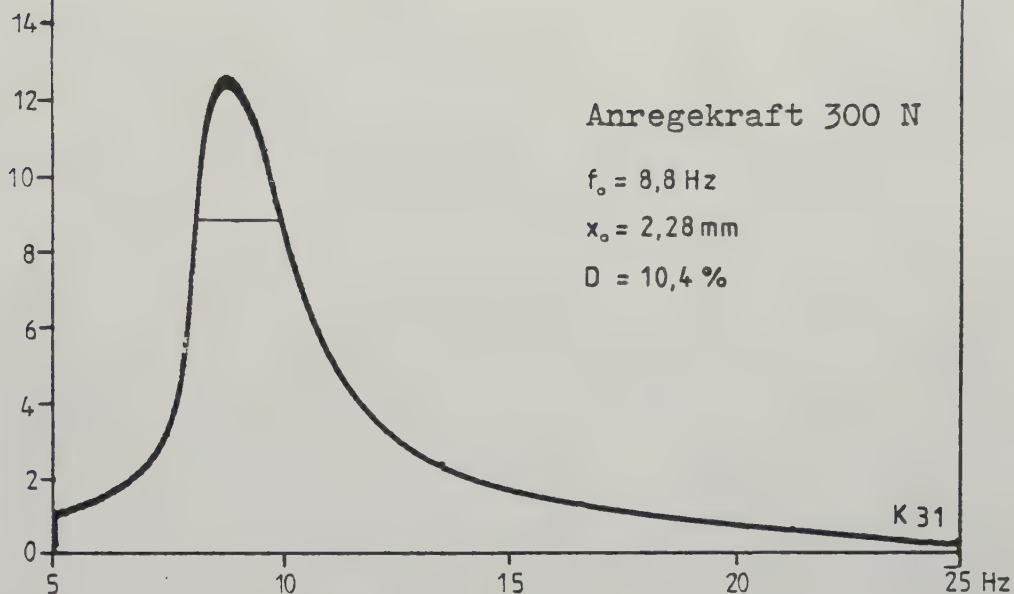
Wiederholung mit bereits gerissener Mauer

Geschwindigkeit [cm/s]



Wiederholung mit bereits gerissener Mauer

Geschwindigkeit [cm/s]

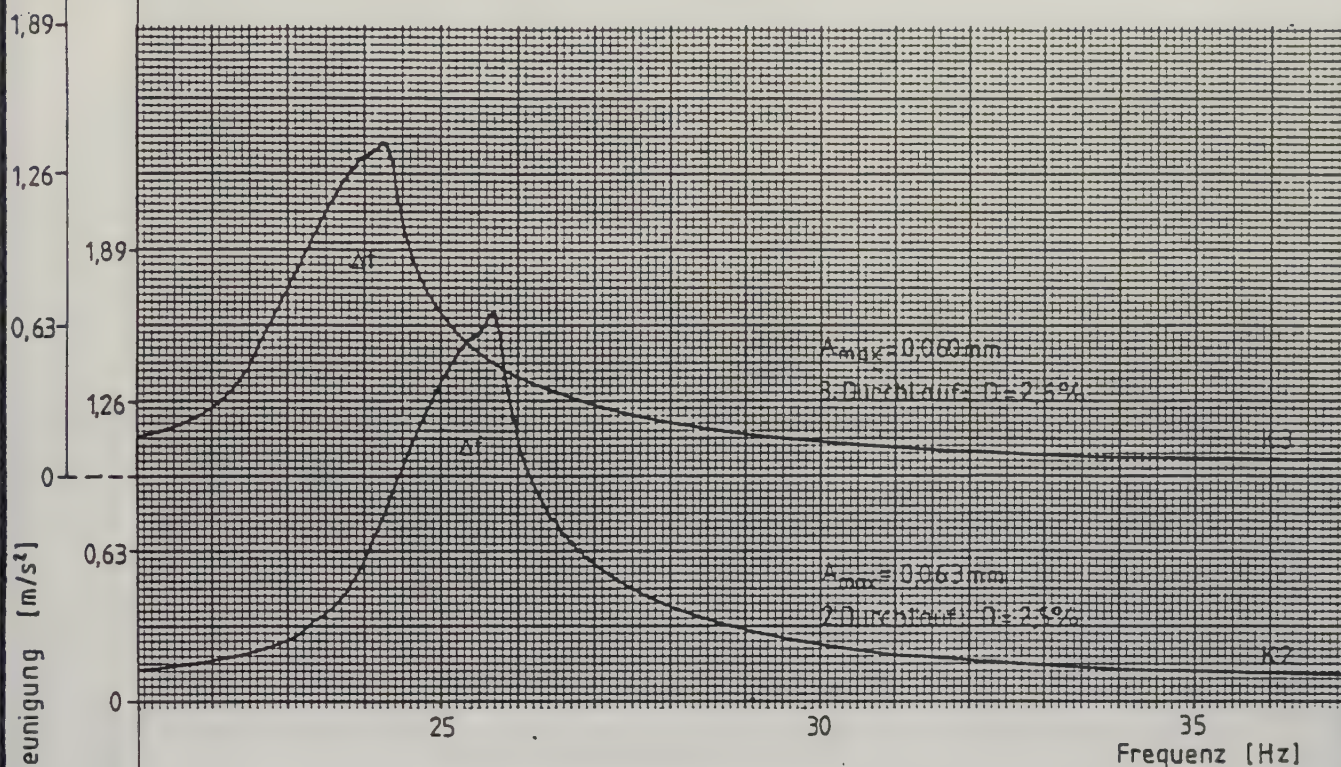


Wiederholung mit bereits gerissener Mauer

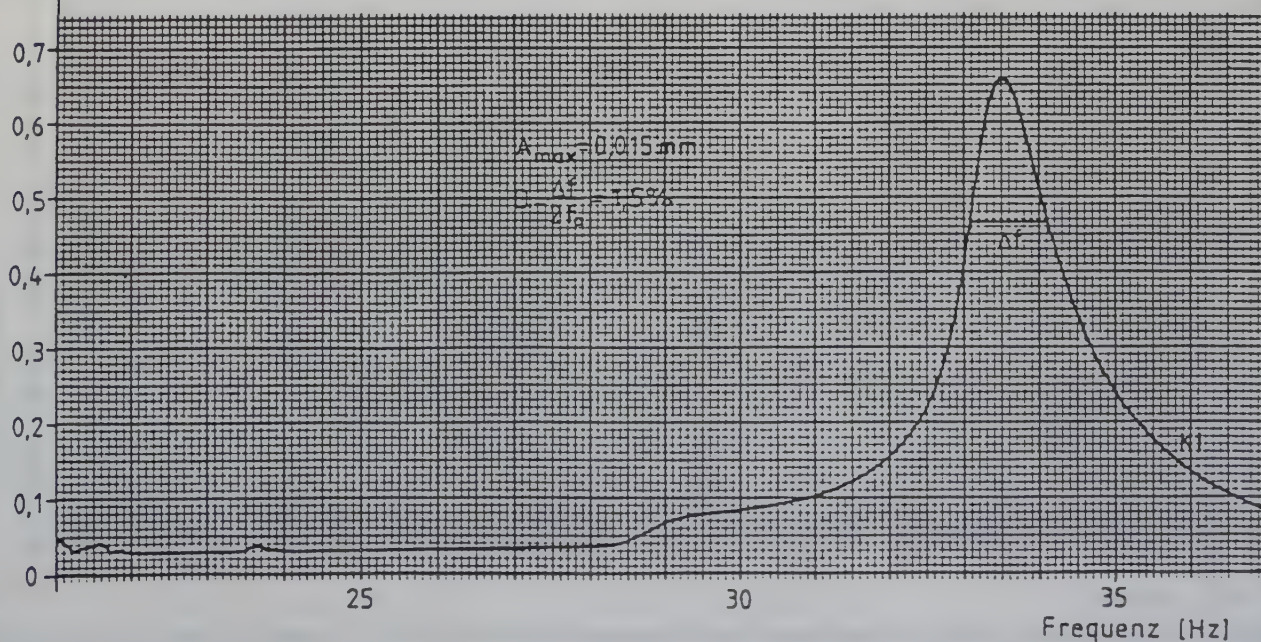


K2 und K3:

Massenkraft in Schwingkopfhöhe 300 N



Massenkraft in Schwingkopfhöhe 75 N



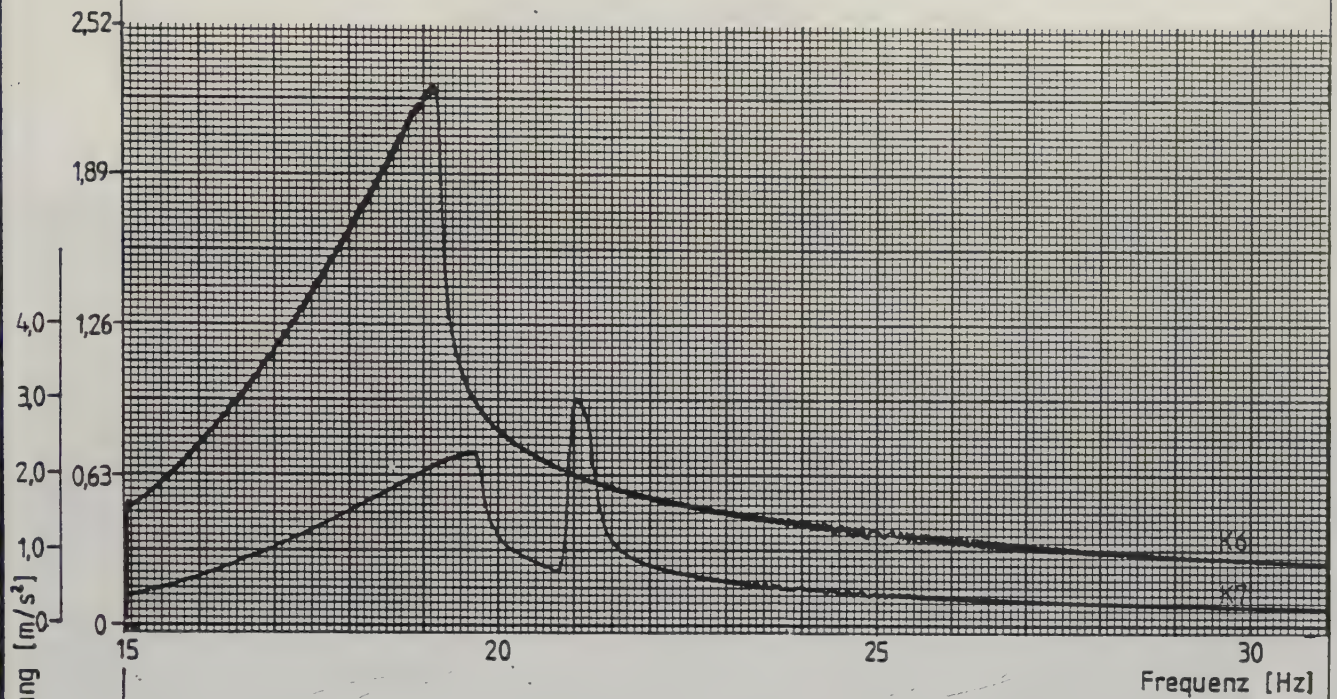
| - 162 -            |                 | 4.Kalksandsteinwand 11,5 cm (2. Vers.)<br>Wertetabelle<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                                       |                           |                                 | Prüfaufbau<br>Variante 3 |  |
|--------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|--------------------------|--|
| Anregekraft<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermitte                                                                                   |                                       |                           | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>Z<br>(Ns/m)  |  |
|                    |                 | Frequenz<br>(Hz)                                                                             | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                                 |                          |  |
| 50                 | (4,0)           | 24,2                                                                                         | 1,860                                 | 1,223                     | 0,080                           | 4088                     |  |
| 50                 | 3,2*            | 23,5                                                                                         | 2,079                                 | 1,408                     | 0,095                           | 3551                     |  |
| 70                 | (3,4)           | 23,5                                                                                         | 2,812                                 | 1,904                     | 0,129                           | 3676                     |  |
| 70                 | (6,0)           | 21,6                                                                                         | 2,126                                 | 1,566                     | 0,115                           | 4470                     |  |
| 70                 | (5,3)           | 19,1                                                                                         | 2,268                                 | 1,890                     | 0,157                           | 3704                     |  |
| 100                | (6,2)           | 21,0                                                                                         | 3,000                                 | 2,274                     | 0,172                           | 4398                     |  |
| 100                | (10,5)          | 19,7                                                                                         | 2,300                                 | 1,858                     | 0,150                           | 5382                     |  |
| 100                | (11,4)          | 18,9                                                                                         | 2,200                                 | 1,853                     | 0,156                           | 5397                     |  |
| 200                | (11,4)          | 19,9                                                                                         | 4,400                                 | 3,519                     | 0,281                           | 5683                     |  |
| 200                | (18,1)          | 16,0                                                                                         | 3,500                                 | 3,482                     | 0,346                           | 5744                     |  |
| 200                | (21,6)          | 15,1                                                                                         | 3,200                                 | 3,373                     | 0,355                           | 5929                     |  |
| 300                | (20,8)          | 15,1                                                                                         | 4,900                                 | 5,165                     | 0,544                           | 5809                     |  |
| 400                | (26,3)          | 14,7                                                                                         | 5,800                                 | 6,280                     | 0,680                           | 6369                     |  |
| 500                | (29,9)          | 14,5                                                                                         | 6,800                                 | 7,464                     | 0,879                           | 6699                     |  |
| 500                | (20,6)          | 13,6                                                                                         | 8,200                                 | 9,596                     | 1,123                           | 5211                     |  |
| 700                | (9,0)           | 14,1                                                                                         | 17,325                                | 19,556                    | 2,207                           | 3579                     |  |
| 700                | (8,7)           | 12,2                                                                                         | 17,640                                | 23,012                    | 3,002                           | 3042                     |  |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve  
( ) : ausgerechneter Wert; K<sub>2</sub> = 1344 kg

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve  
( ) : ausgerechneter Wert; K<sub>2</sub> = 1344 kg

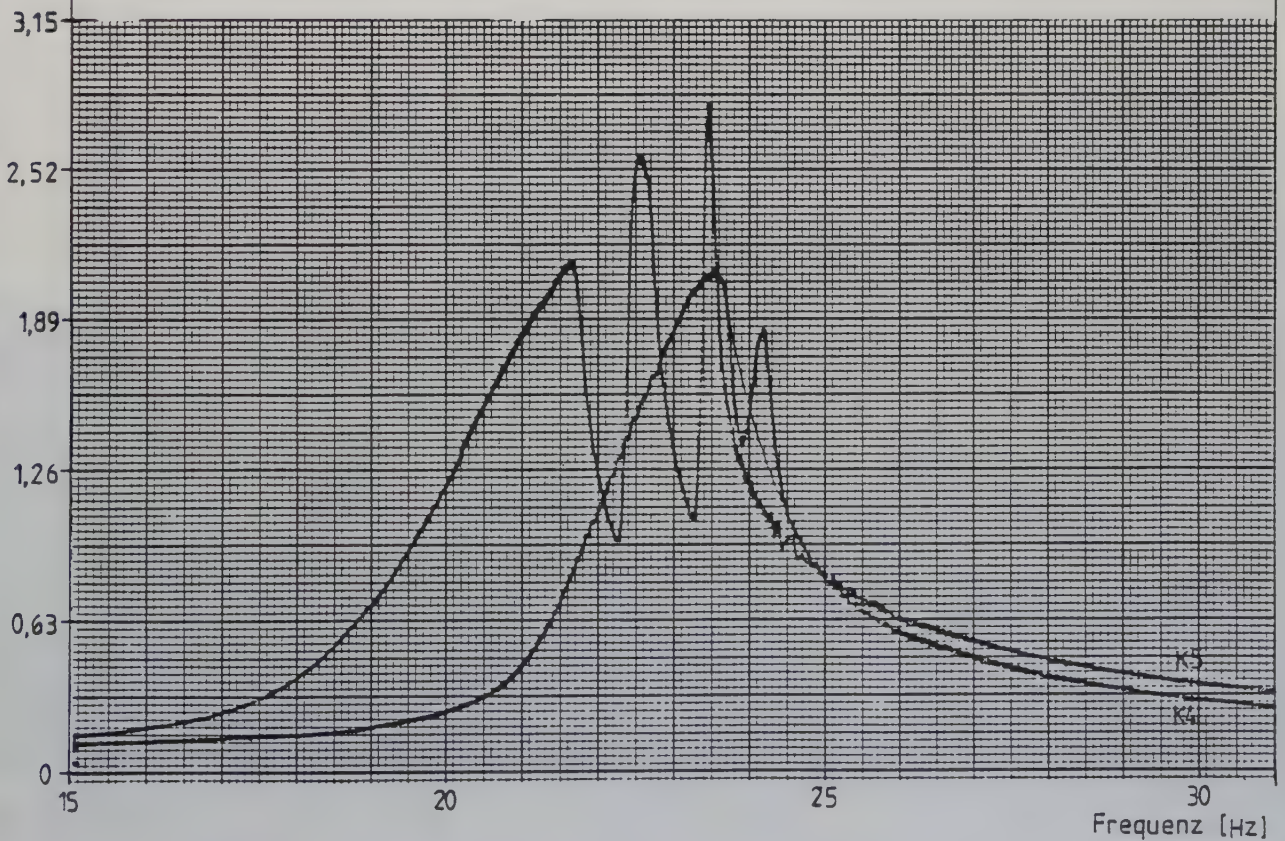
K6: Anregekraft 70 N

K7: Anregekraft 100 N



K5: Anregekraft 70 N

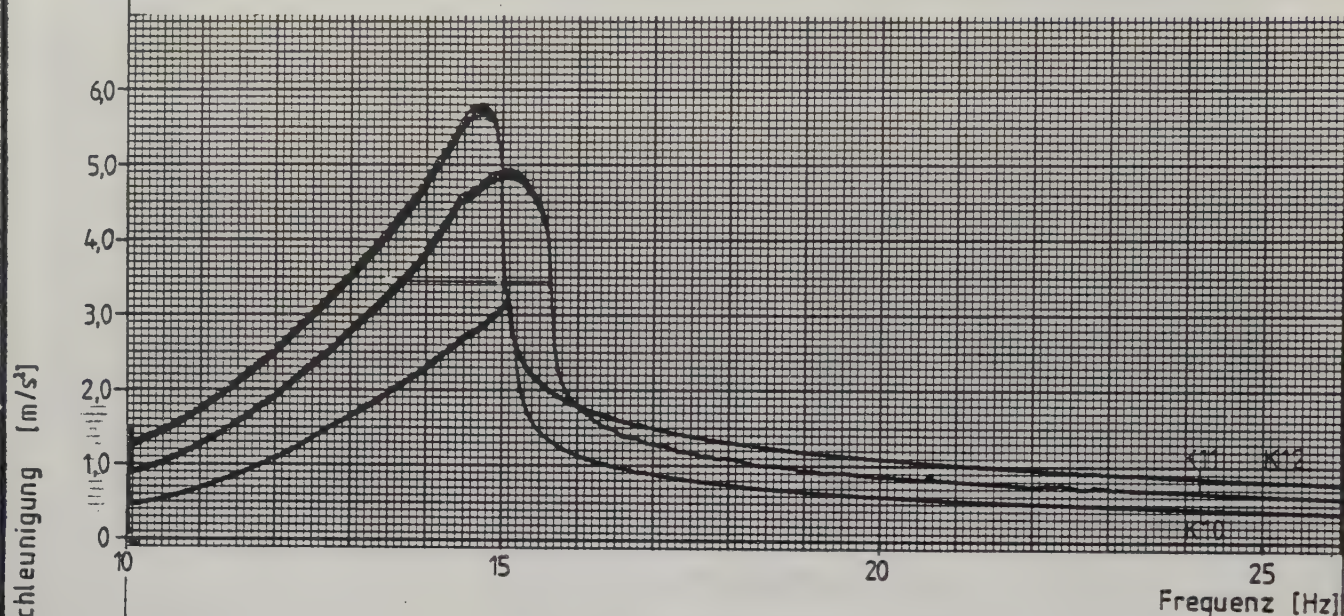
K4: Anregekraft 50 N



K12: Anregekraft 400 N

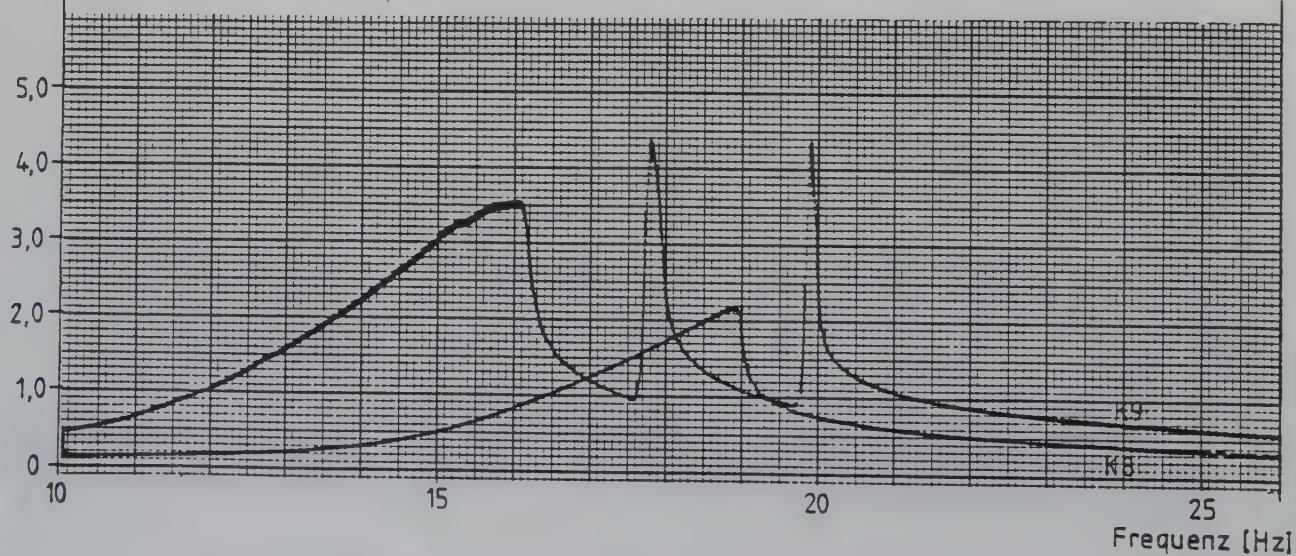
K11: Anregekraft 300 N

K10: Anregekraft 200 N

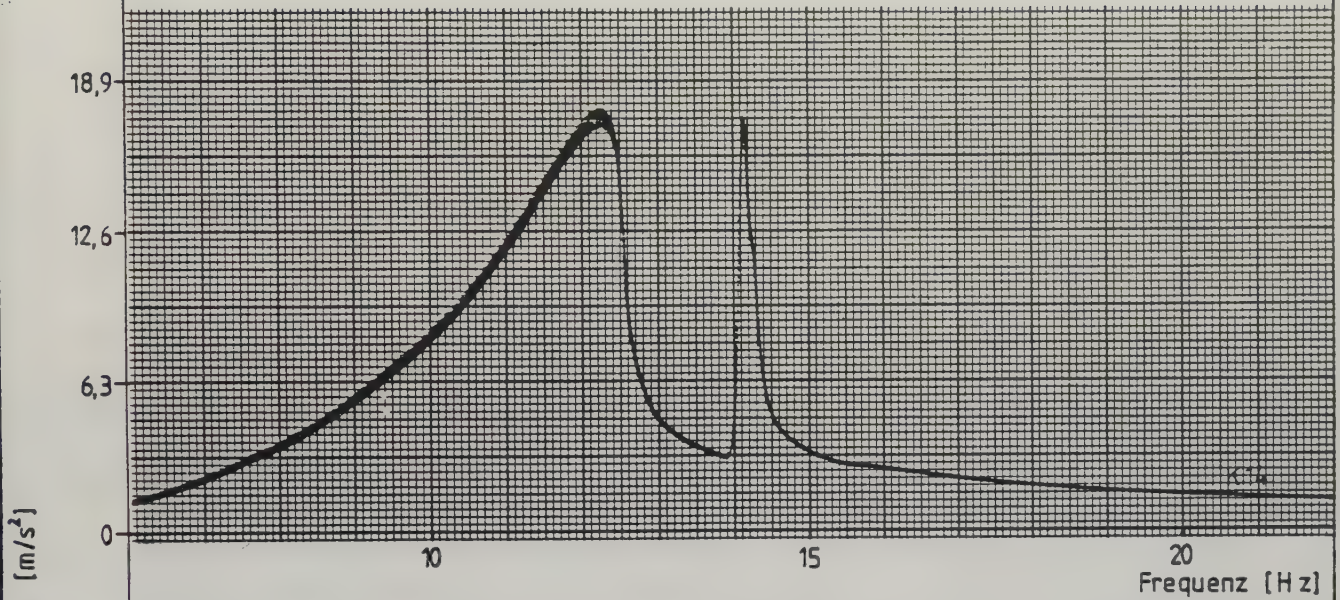


K9: Anregekraft 200 N

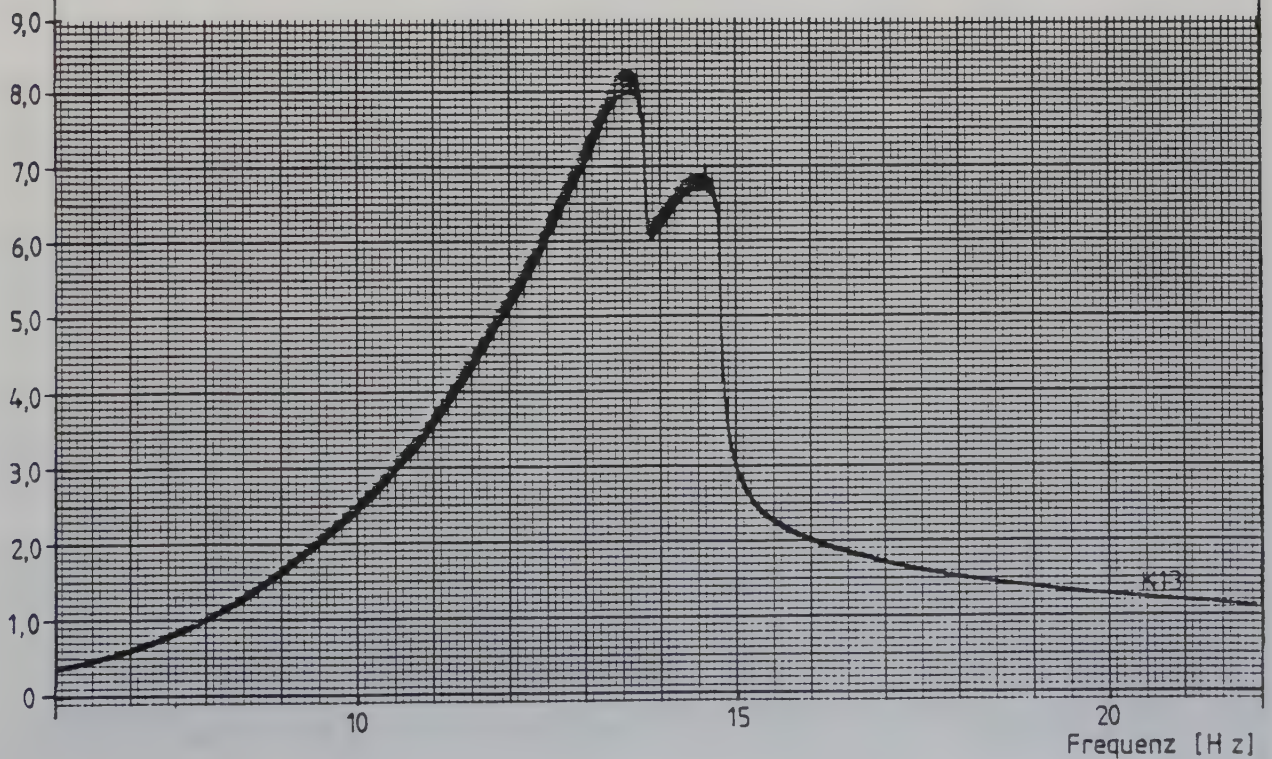
K8: Anregekraft 100 N



Anregekraft 700 N



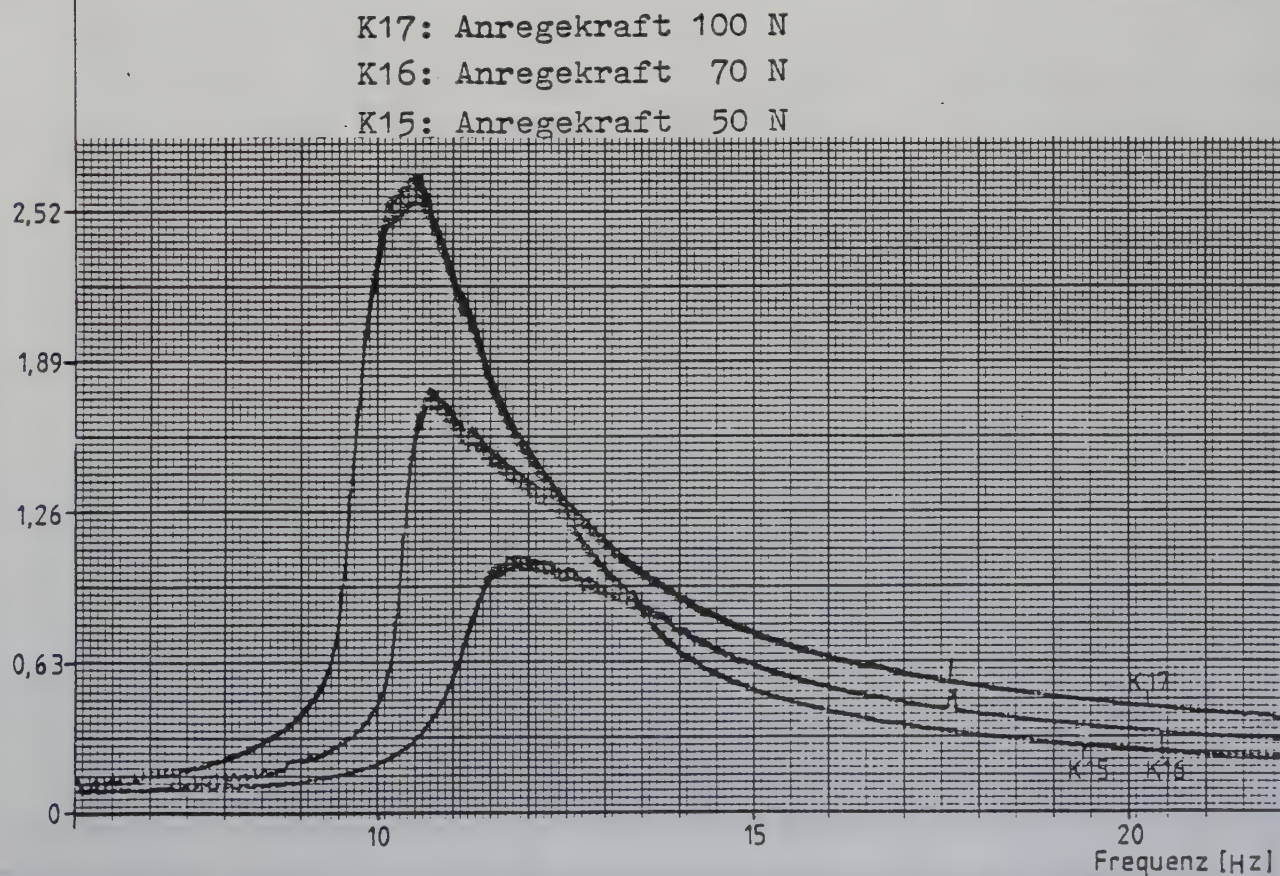
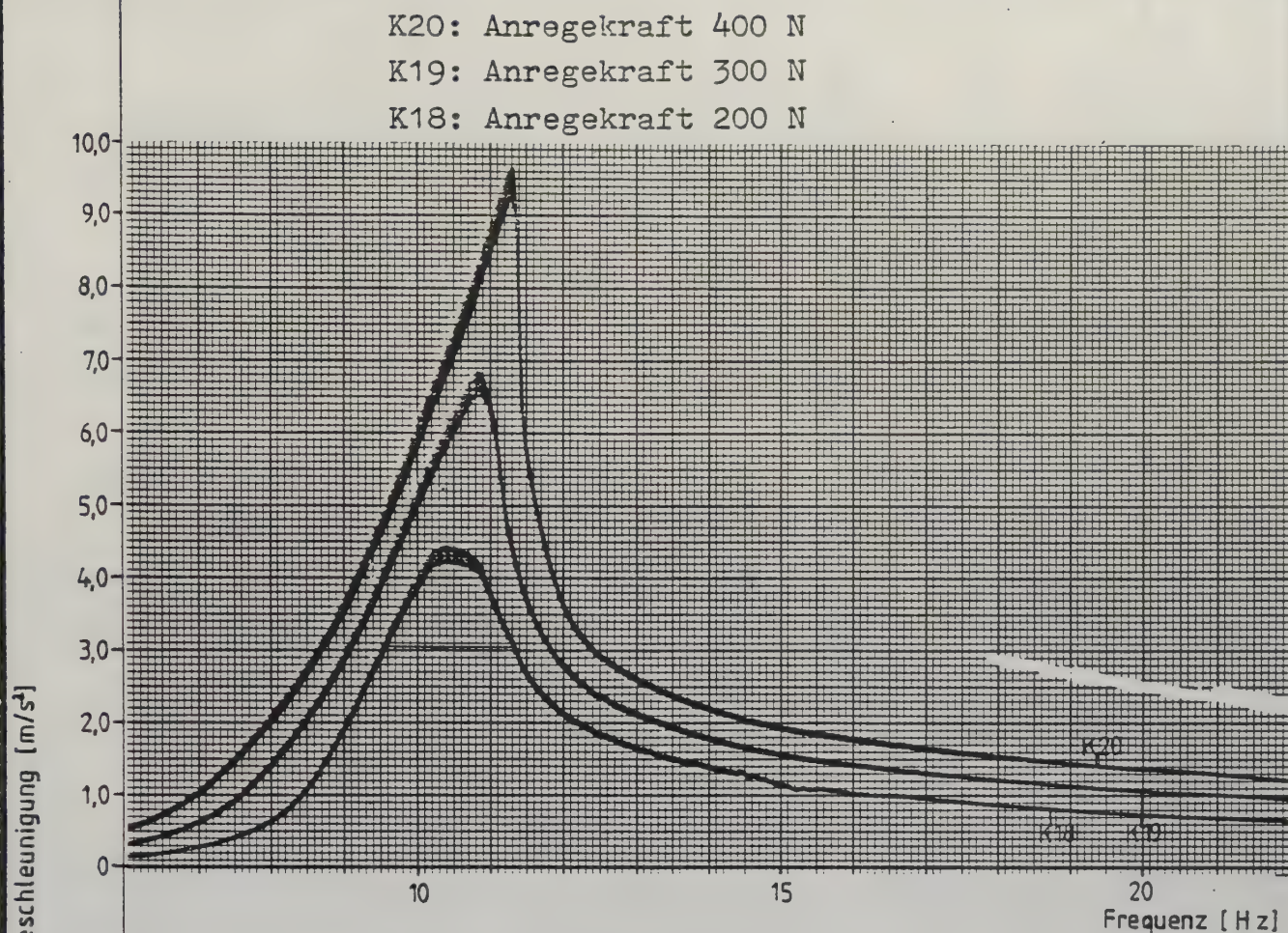
Anregekraft 500 N



| - 166 -             |                 | 4.Kalksandsteinwand 11,5 cm (3.Vers.)<br>Wertetabelle<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                                       |                           | Prüfaufbau<br>Variante 3        |                         |
|---------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Anregerkraft<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermittle                                                                                 |                                       |                           | Angegekpt.<br>Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>Z<br>(Ns/m) |
|                     |                 | Frequenz<br>(Hz)                                                                            | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                                 |                         |
| 50                  | (10,8)          | 11,8                                                                                        | 1,043                                 | 1,407                     | 0,190                           | 3554                    |
| 70                  | (7,9)           | 10,7                                                                                        | 1,706                                 | 2,538                     | 0,377                           | 2758                    |
| 100                 | 8,1*            | 10,5                                                                                        | 2,623                                 | 3,976                     | 0,603                           | 2515                    |
| 200                 | 8,7*            | 10,4                                                                                        | 4,300                                 | 6,580                     | 1,007                           | 3040                    |
| 300                 | (9,6)           | 10,8                                                                                        | 6,650                                 | 9,800                     | 1,444                           | 3061                    |
| 400                 | (8,5)           | 11,3                                                                                        | 9,400                                 | 13,239                    | 1,865                           | 3021                    |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve

( ): ausgerechneter Wert; K = 1458 kg



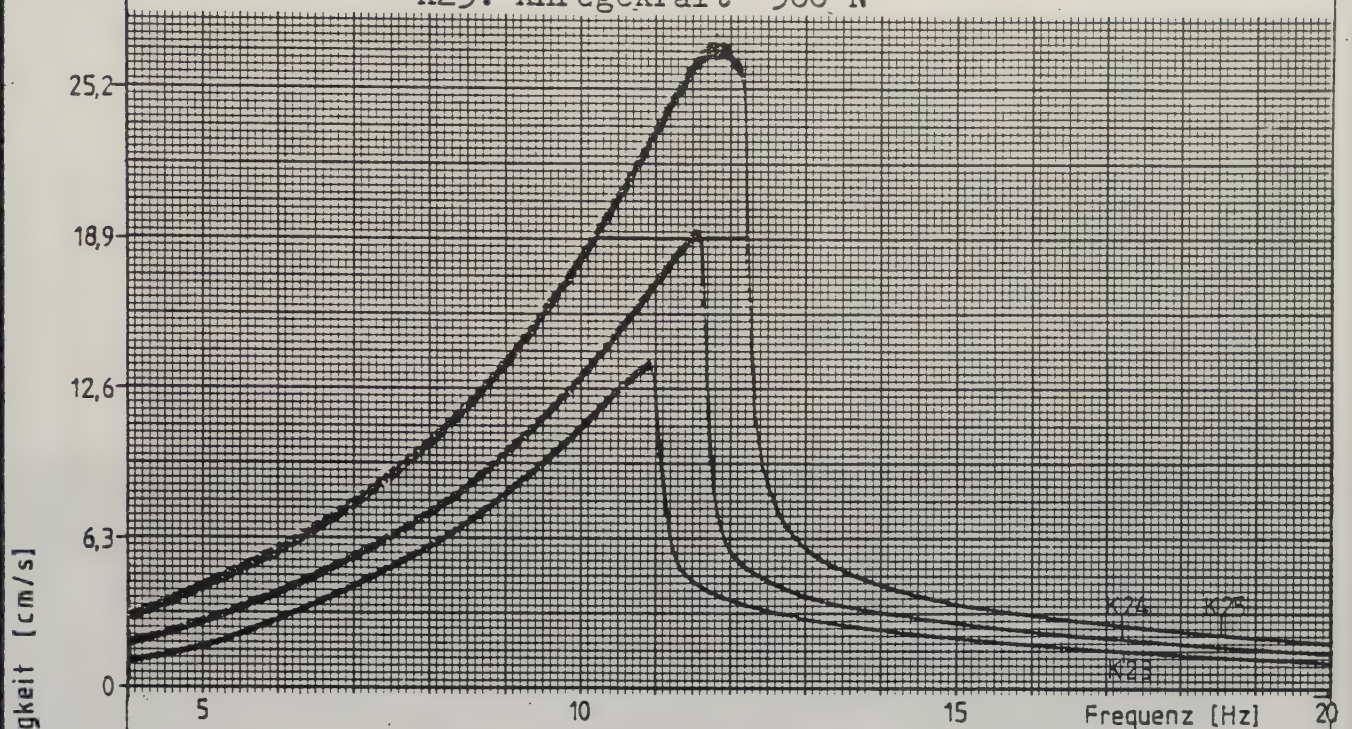
| Anregerkraft<br>(N) |        | Dämpfung<br>(%)  | Mauermittel                           |                           |                   |       | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>Z<br>(Ns/m) |
|---------------------|--------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|-------|---------------------------------|-------------------------|
|                     |        | Frequenz<br>(Hz) | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) |       |                                 |                         |
| 300                 | (16,4) | 10,1             | 5,077                                 | 8,00                      | 1,261             | 0,788 | 3750                            |                         |
| 400                 | (13,3) | 10,6             | 7,526                                 | 11,30                     | 1,697             | 1,066 | 3540                            |                         |
| 500                 | (13,0) | 10,9             | 9,520                                 | 13,90                     | 2,030             | 1,270 | 3597                            |                         |
| 700                 | (11,9) | 11,5             | 13,931                                | 19,28                     | 2,668             | 1,661 | 3631                            |                         |
| 1000                | (11,6) | 11,8             | 20,152                                | 27,18                     | 3,666             | 2,408 | 3679                            |                         |
| 1500                | (3,2)  | 12,5             | 57,334                                | 73,00                     | 9,295             | 6,076 | 2055                            |                         |
| 1500                | (13,4) | 10,3             | 28,138                                | 43,50                     | 6,725             | 4,424 | 3448                            |                         |

( ): ausgerechneter Wert; K = 1458 kg

K25: Anregekraft 1000 N

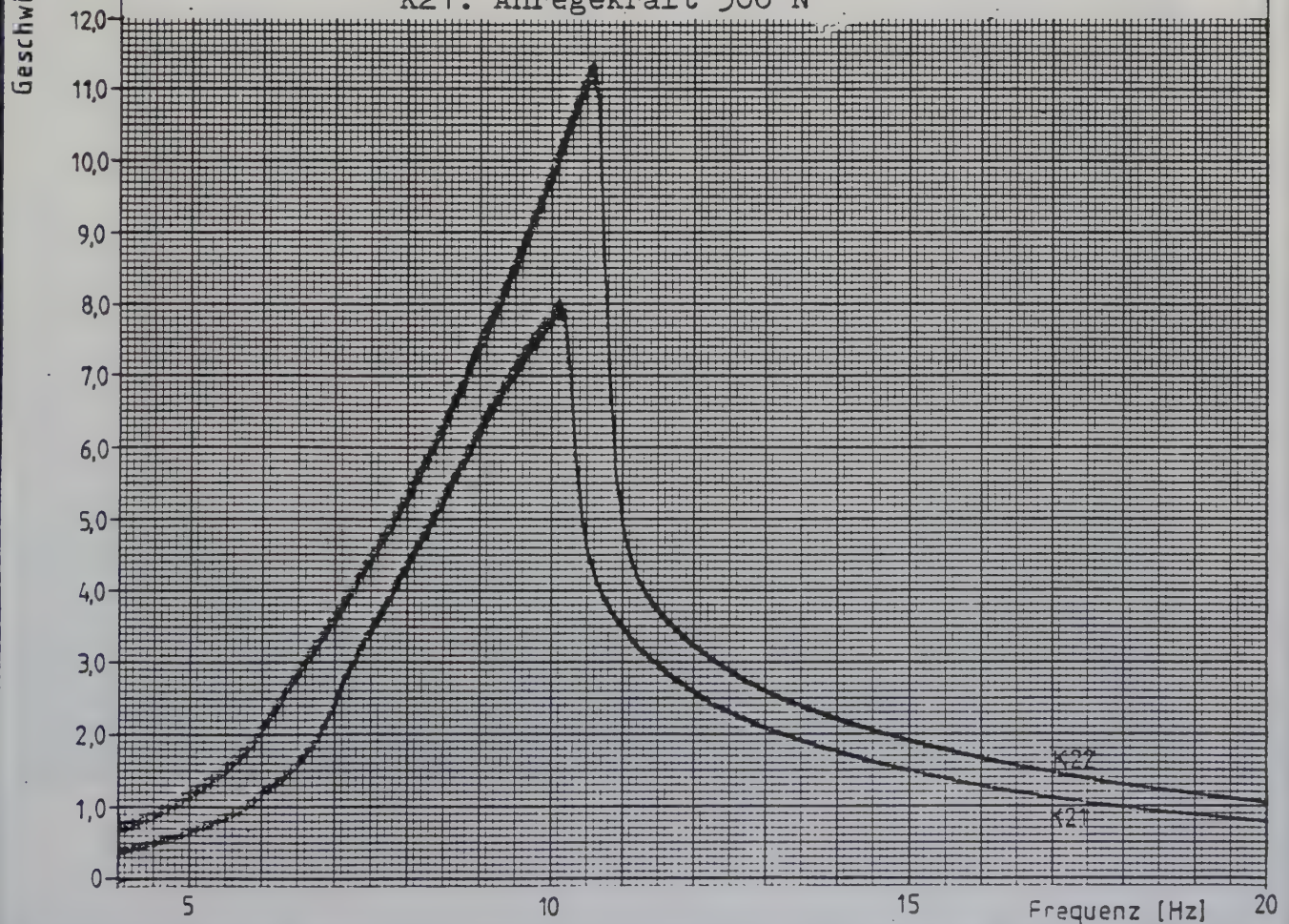
K24: Anregekraft 700 N

K23: Anregekraft 500 N

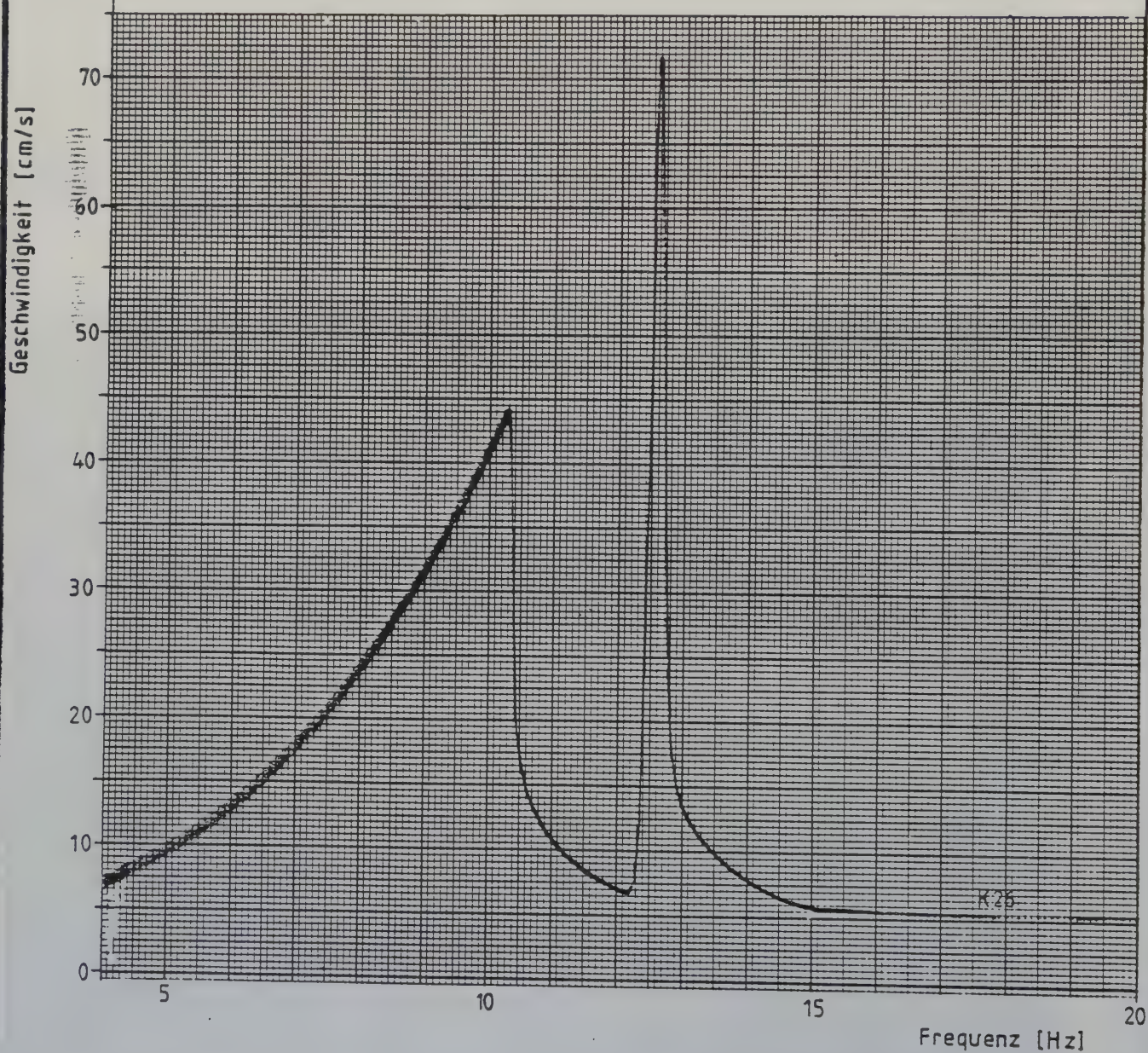


K22: Anregekraft 400 N

K21: Anregekraft 300 N



Anregekraft 1500 N



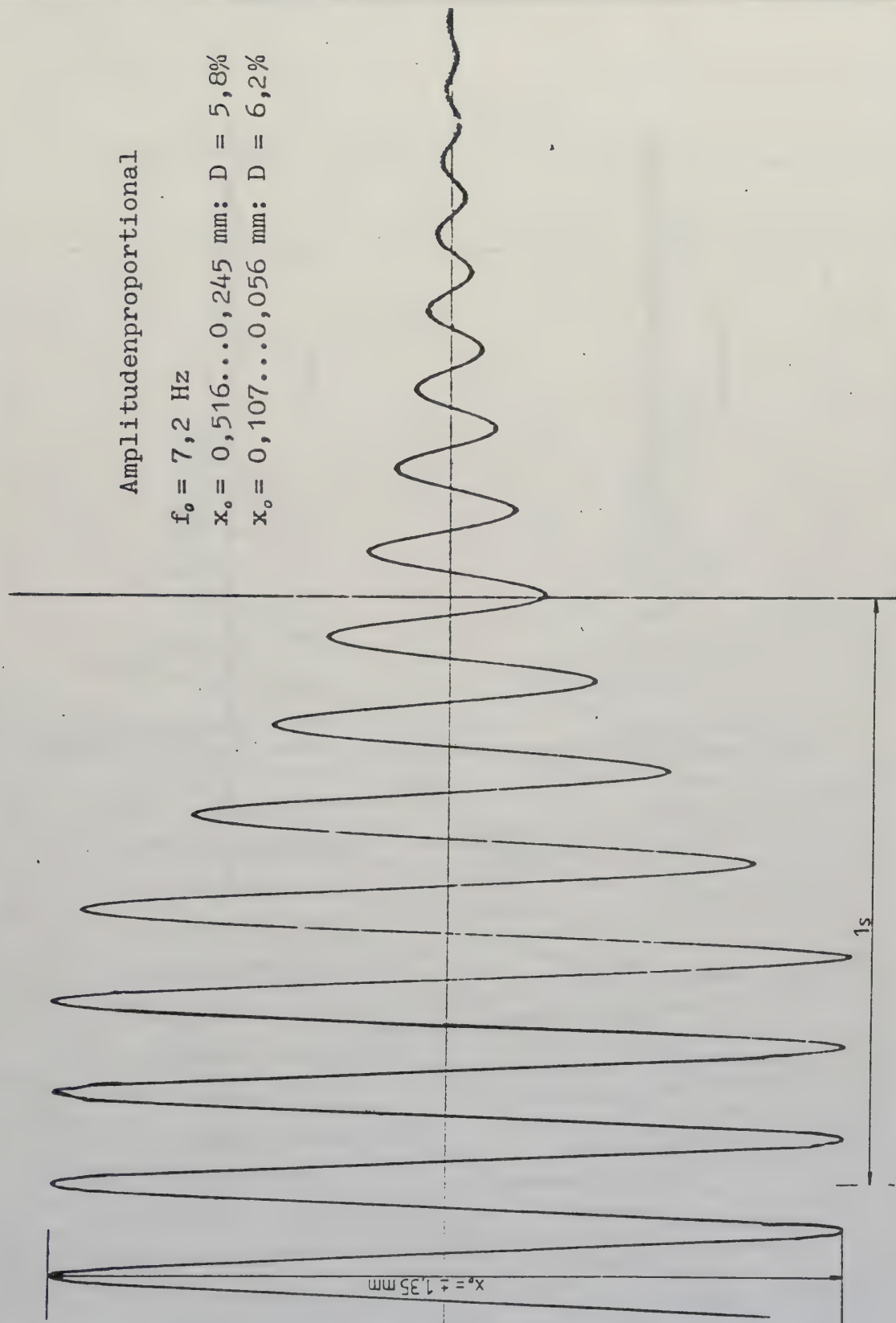
Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

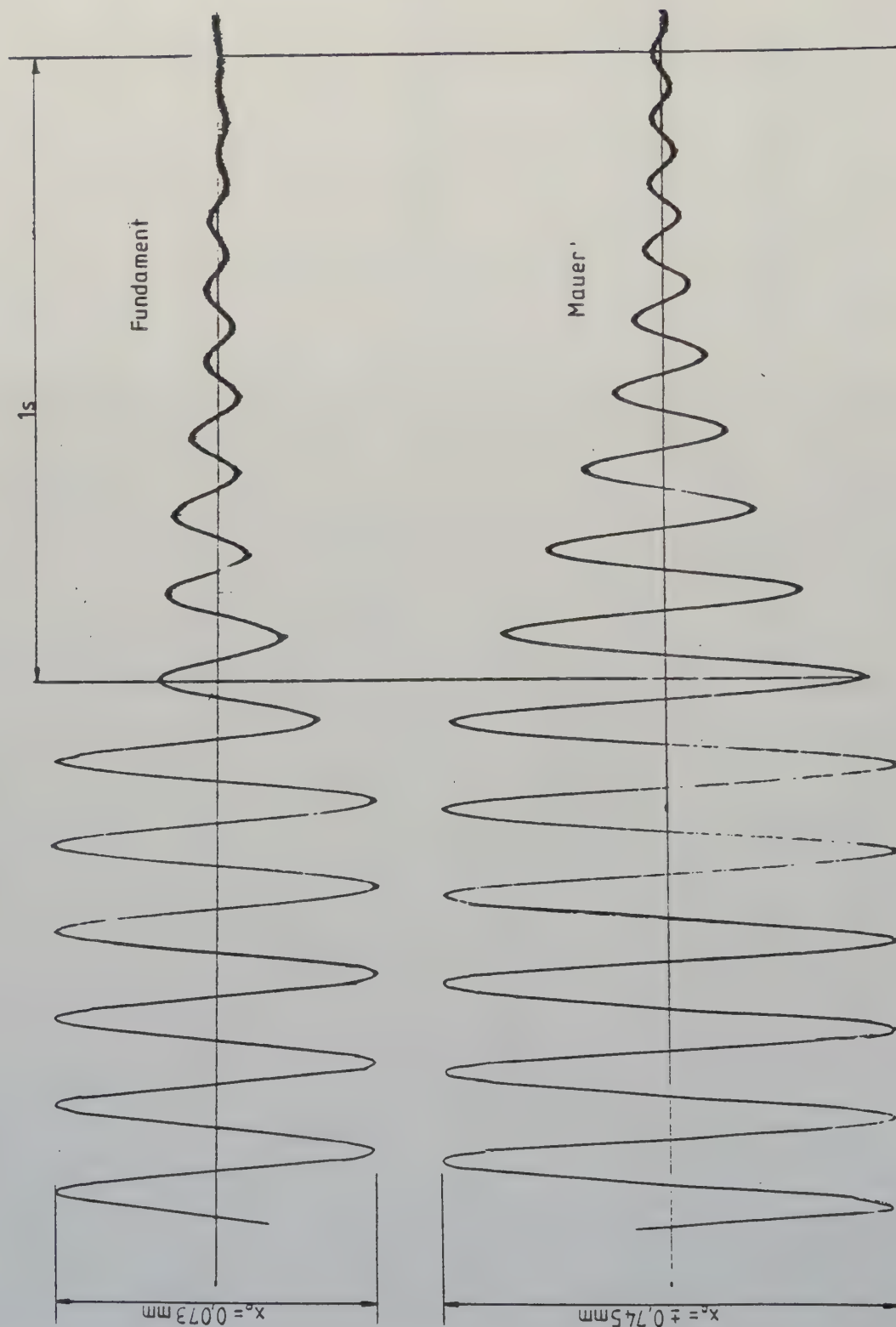
$$f_0 = 7,2 \text{ Hz}$$

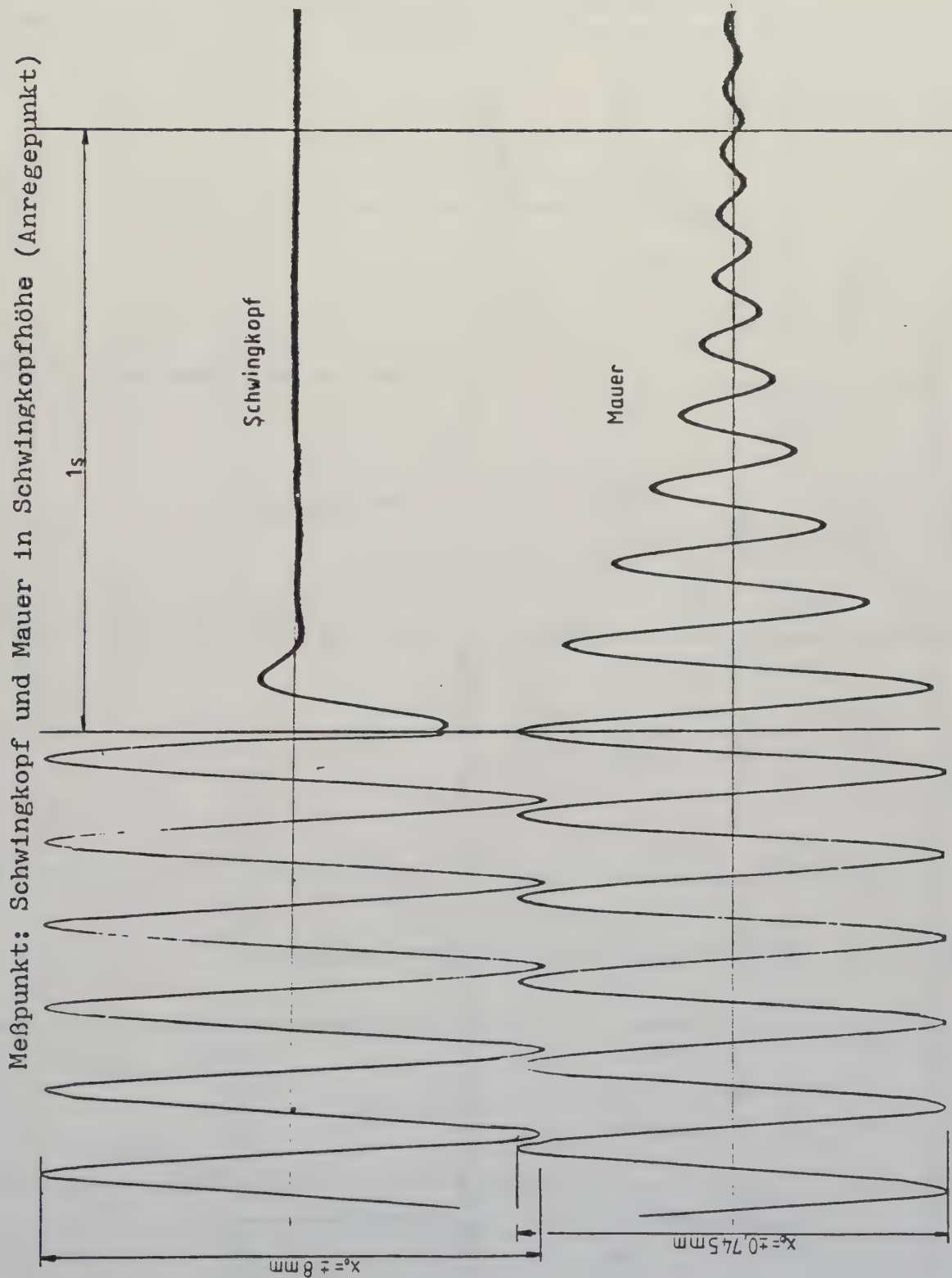
$$x_0 = 0,516 \dots 0,245 \text{ mm}; D = 5,8\%$$

$$x_0 = 0,107 \dots 0,056 \text{ mm}; D = 6,2\%$$



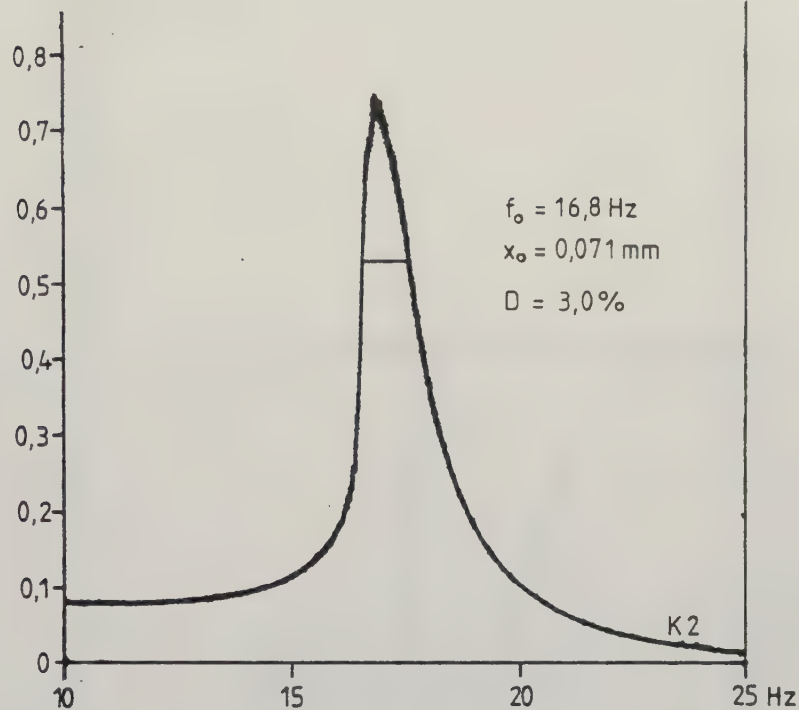
Meßpunkt: Mauer und Fundament in Schwingkopfhöhe (Anregepunkt)



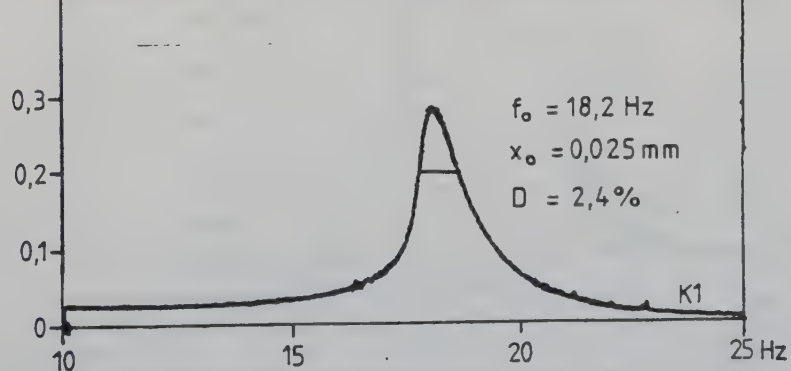


| - 174 -                                       |                 | Kalksandsteinwand 24 cm (1.Vers.) |                                       |                                         |                   | Prüfaufbau                      |                                 |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                                               |                 | Wertetabelle                      |                                       |                                         |                   | Variante 1                      |                                 |
|                                               |                 | Anregung über Fundamentblock      |                                       |                                         |                   |                                 |                                 |
| Massenkraft<br>Schwingkopf<br>(N)             | Dämpfung<br>(%) | Frequenz<br>(Hz)                  | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Mauermatte<br>Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
| 103                                           | 2,4*            | 18,2                              | 0,326                                 | 0,285                                   | 0,025             | 0,015                           | 0,080                           |
| 258                                           | 3,0*            | 16,8                              | 0,792                                 | 0,750                                   | 0,071             | 0,044                           | 0,200                           |
| 515                                           | 7,0*            | 14,5                              | 1,302                                 | 1,430                                   | 0,157             | 0,094                           | 0,437                           |
| *: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve |                 |                                   |                                       |                                         |                   |                                 |                                 |

Massenkraft in Schwingkopfhöhe 258N

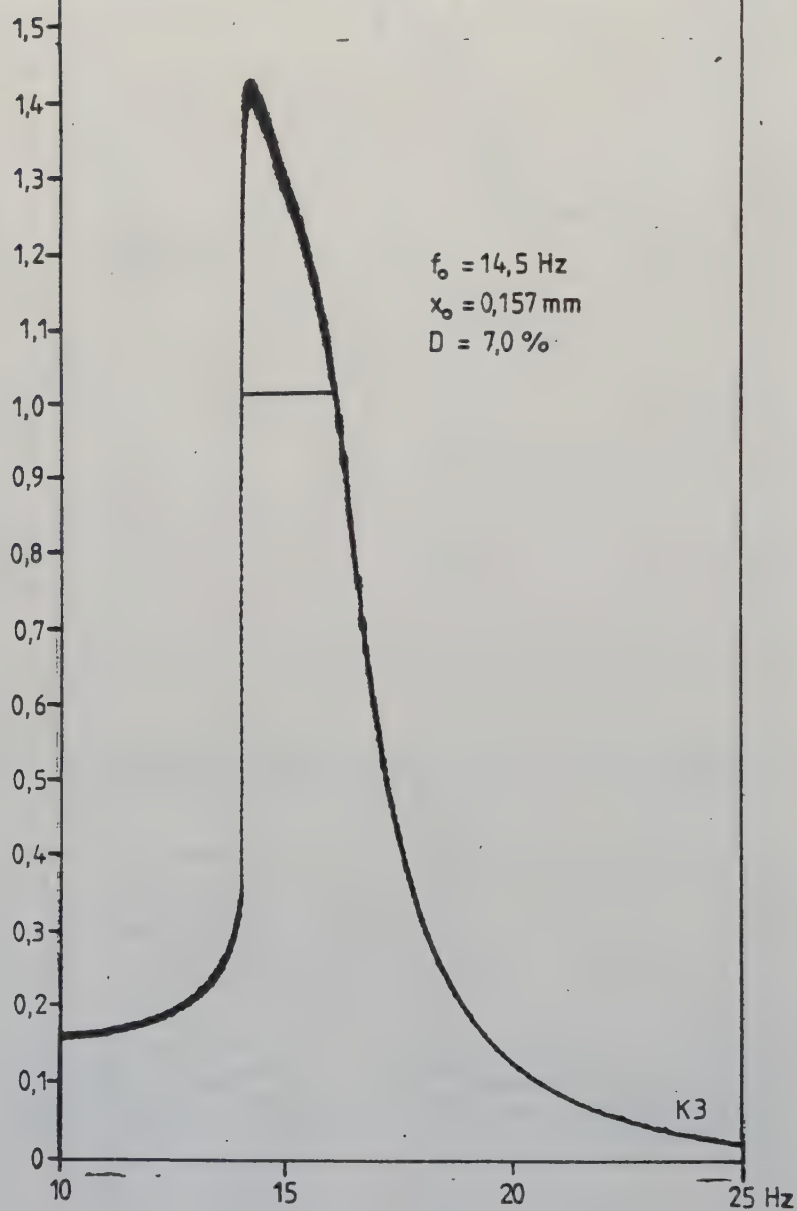


Massenkraft in Schwingkopfhöhe 103N



Geschwindigkeit [cm/s]

Massenkraft in Schwingkopfhöhe 515N



Geschwindigkeit [cm/s]

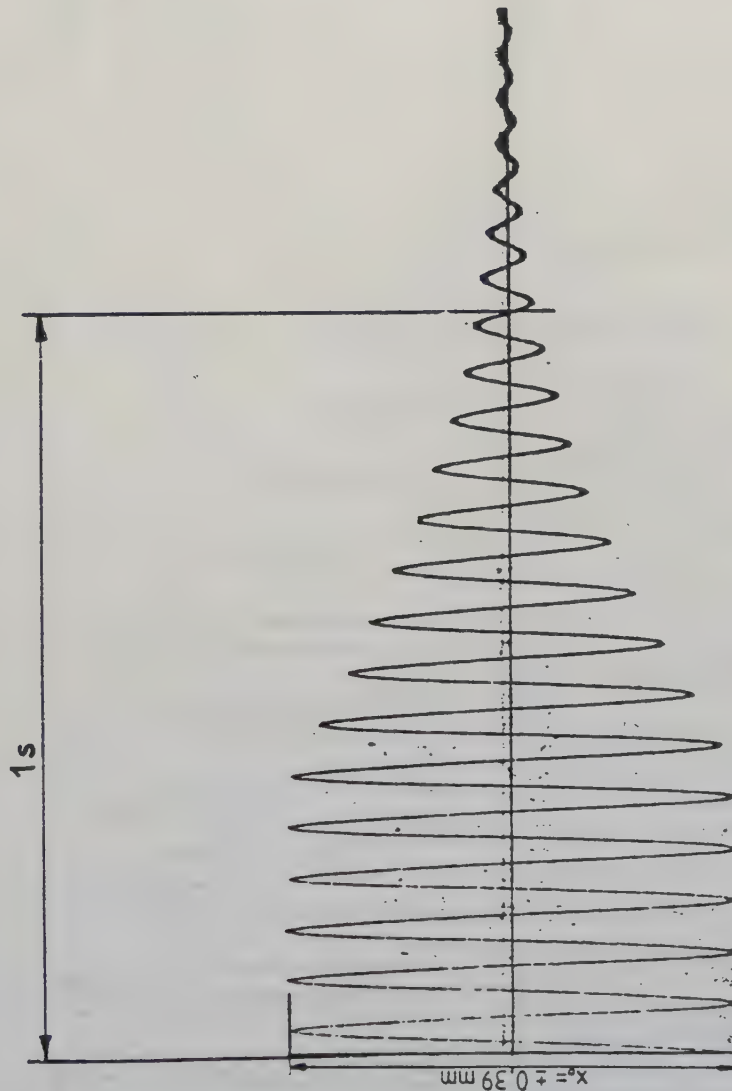
Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

$$f_0 = 15,3 \text{ Hz}$$

$$x_0 = 0,340 \dots 0,244 \text{ mm}; D = 2,7\%$$

$$x_0 = 0,108 \dots 0,034 \text{ mm}; D = 4,4\%$$



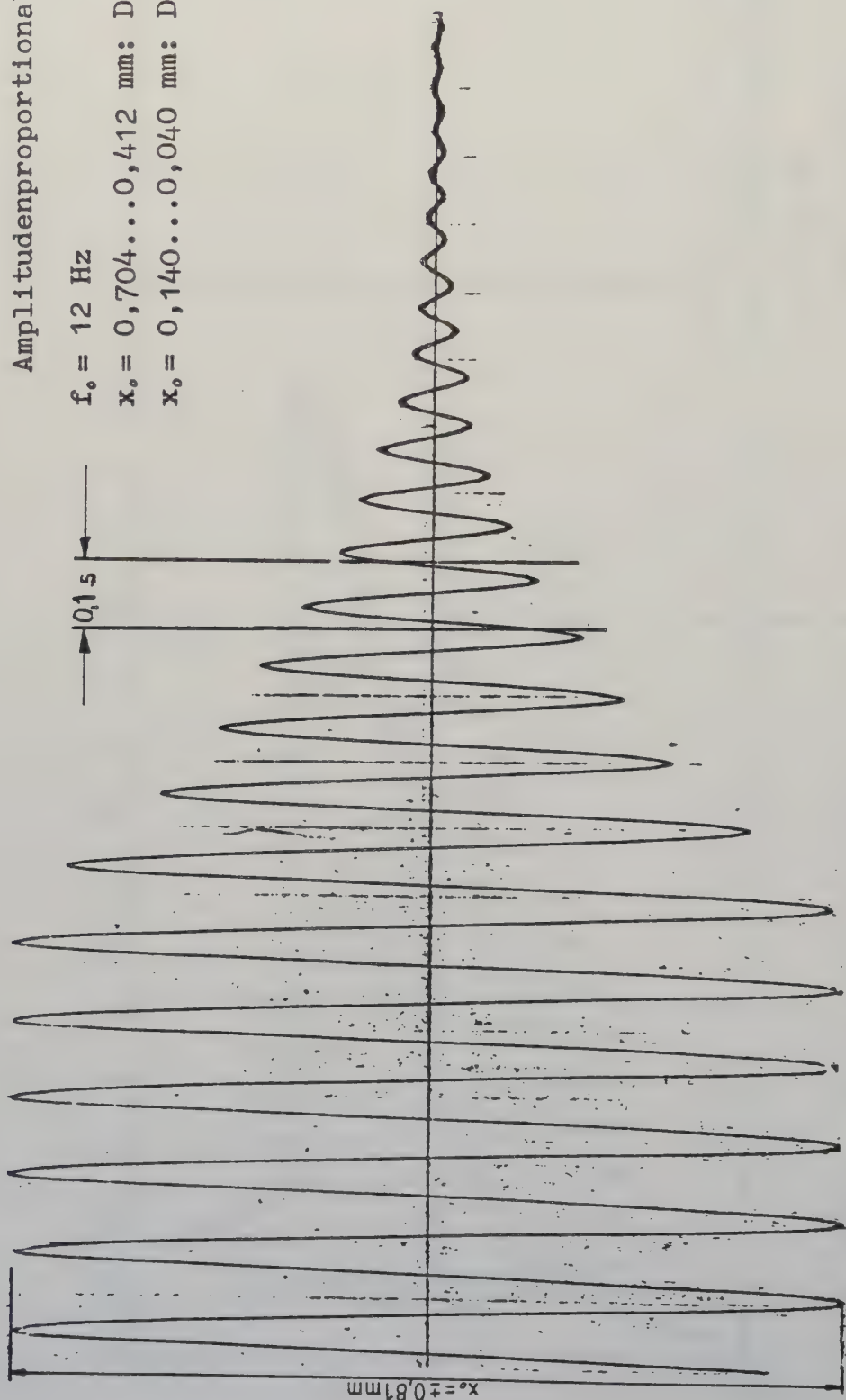
Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

$$f_0 = 12 \text{ Hz}$$

$$x_0 = 0,704 \dots 0,412 \text{ mm: } D = 4,1\%$$

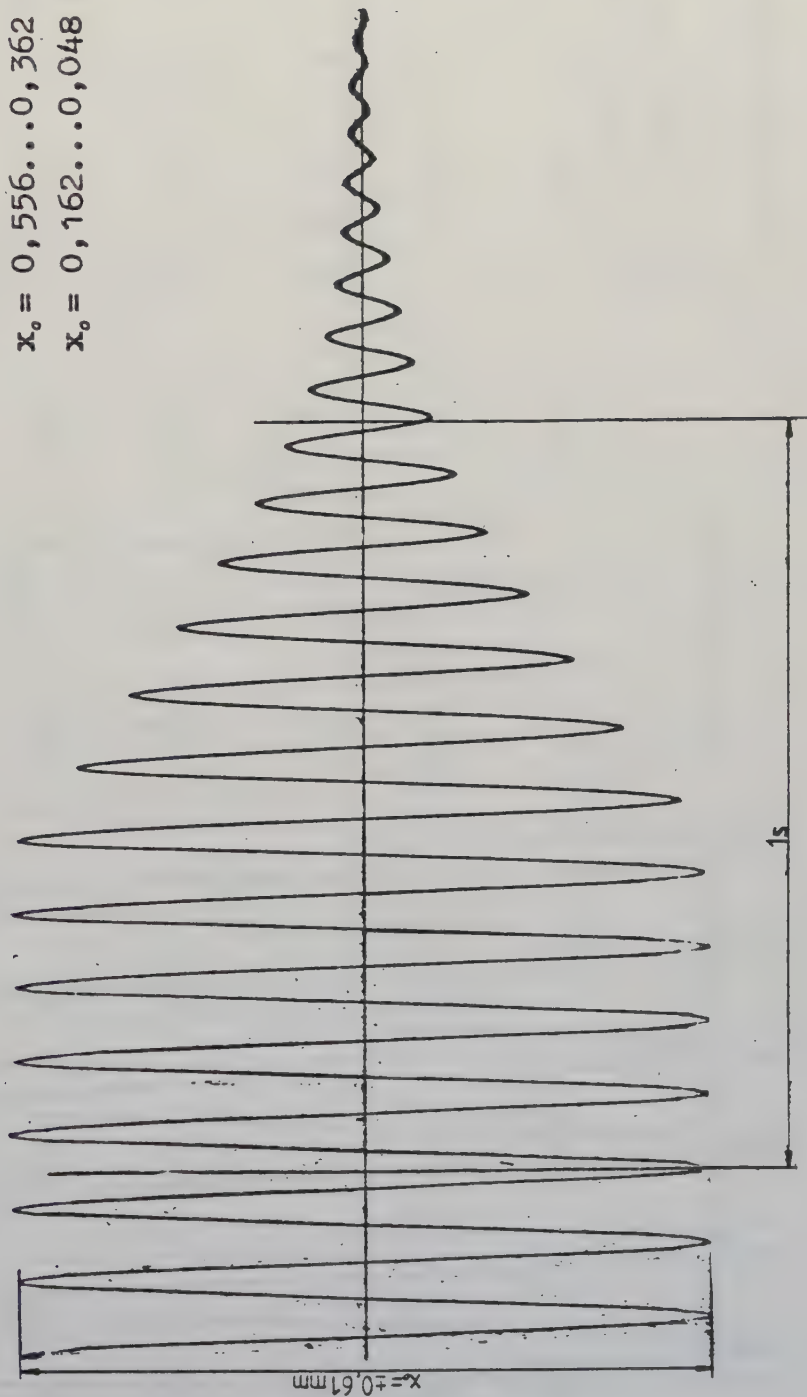
$$x_0 = 0,140 \dots 0,040 \text{ mm: } D = 5,3\%$$



Messpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

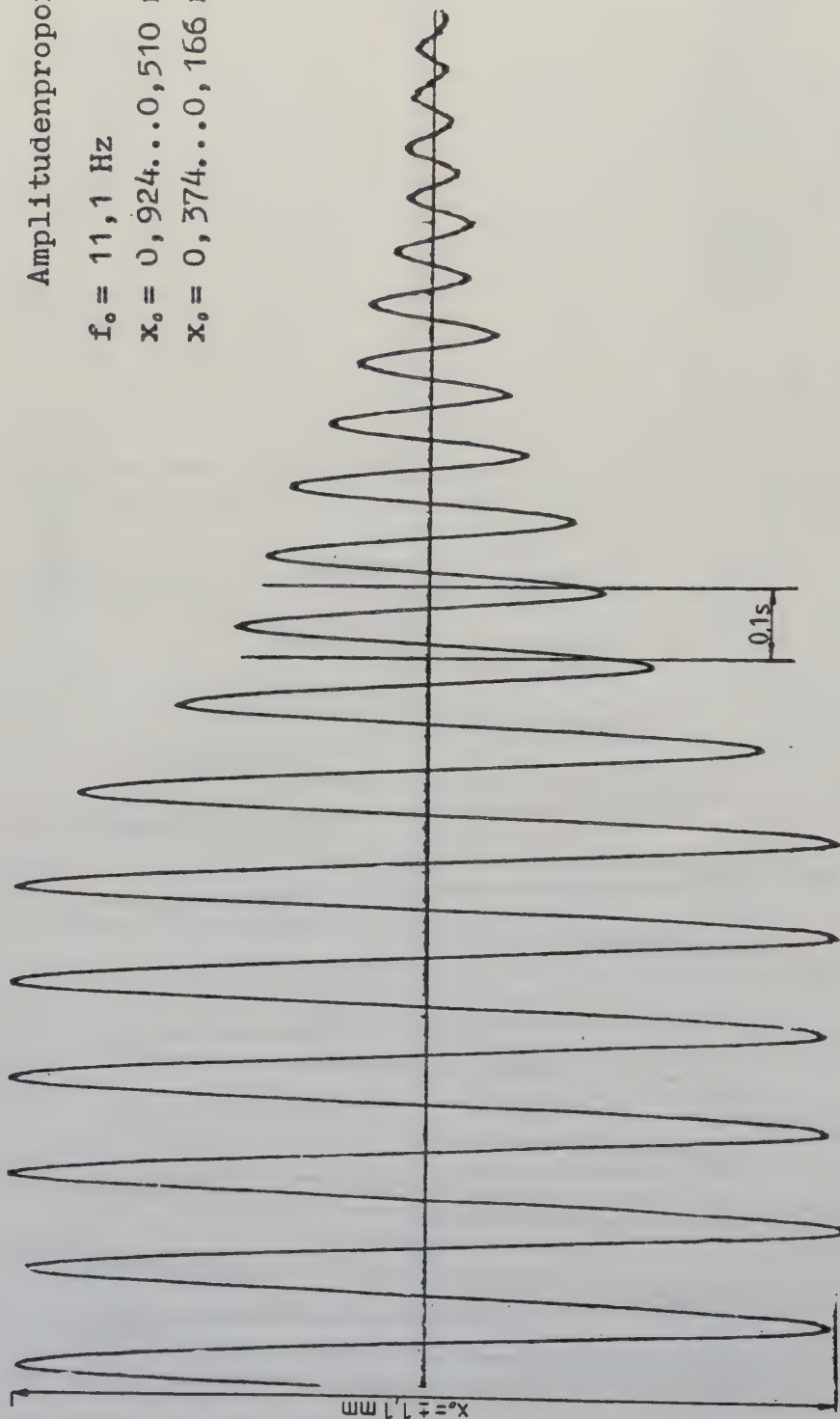
$f_0 = 12,6 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,556 \dots 0,362 \text{ mm}$ :  $D = 3,4\%$   
 $x_0 = 0,162 \dots 0,048 \text{ mm}$ :  $D = 5,3\%$



Meßpunkt: Mauermitte

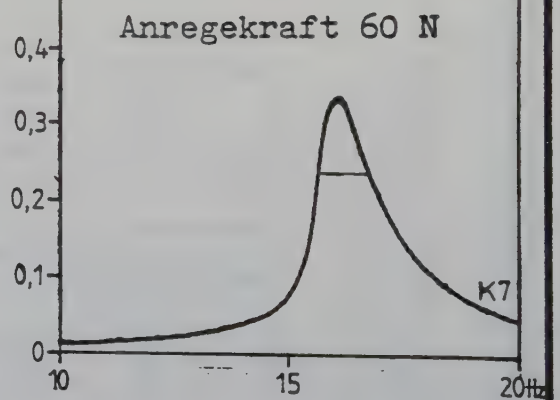
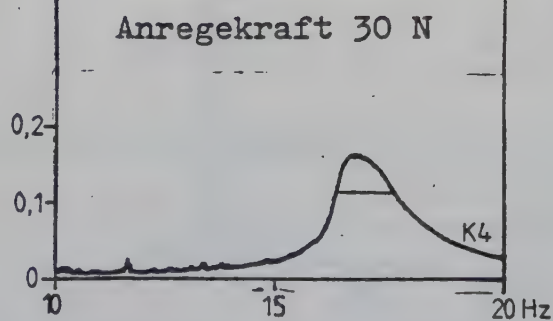
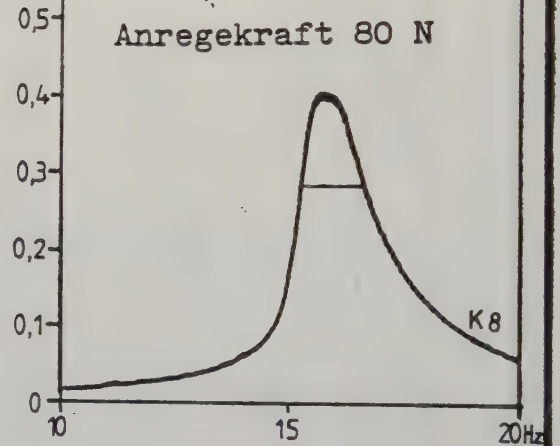
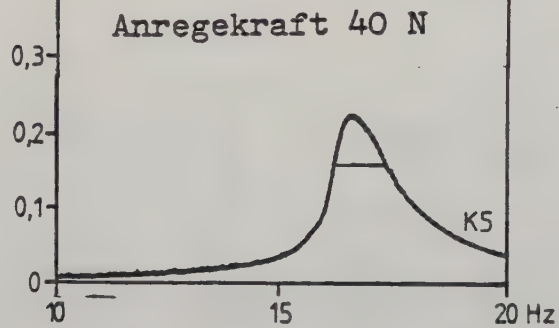
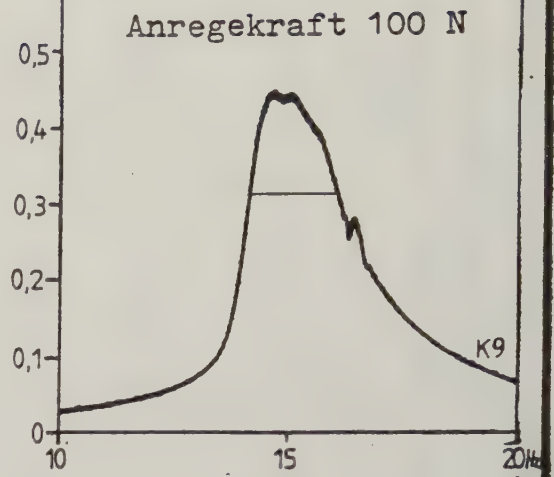
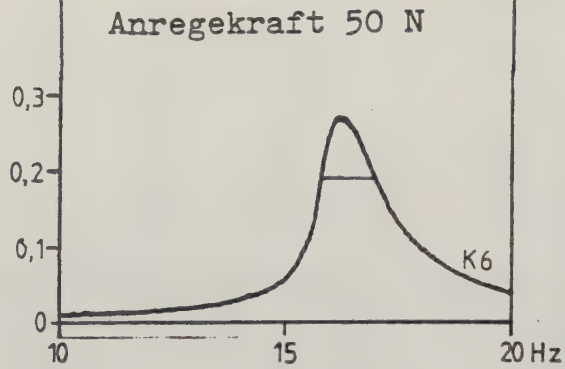
Amplitudenproportional

$f_0 = 11,1 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,924 \dots 0,510 \text{ mm}$   $D = 4,8\%$   
 $x_0 = 0,374 \dots 0,166 \text{ mm}$   $D = 4,6\%$



| - 181 -                                       |                 | Kalksandsteinwand 24 cm (3.Vers.)<br>Wertetabelle<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                                       |                           |                                 | Prüfaufbau<br>Variante 1        |  |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| Anregerkraft<br>(N)                           | Dämpfung<br>(%) | Mauermittte                                                                             |                                       |                           | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |  |
|                                               |                 | Frequenz<br>(Hz)                                                                        | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                                 |                                 |  |
| 30                                            | 3,7*            | 16,8                                                                                    | 0,169                                 | 0,16                      | 0,015                           | 0,047                           |  |
| 40                                            | 3,5*            | 16,6                                                                                    | 0,229                                 | 0,22                      | 0,021                           | 0,063                           |  |
| 50                                            | 3,7*            | 16,3                                                                                    | 0,277                                 | 0,27                      | 0,026                           | 0,079                           |  |
| 60                                            | 3,6*            | 16,1                                                                                    | 0,354                                 | 0,35                      | 0,035                           | 0,095                           |  |
| 80                                            | 4,5*            | 15,7                                                                                    | 0,404                                 | 0,41                      | 0,042                           | 0,124                           |  |
| 100                                           | 6,4*            | 14,9                                                                                    | 0,421                                 | 0,45                      | 0,048                           | 0,131                           |  |
| *: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve |                 |                                                                                         |                                       |                           |                                 |                                 |  |

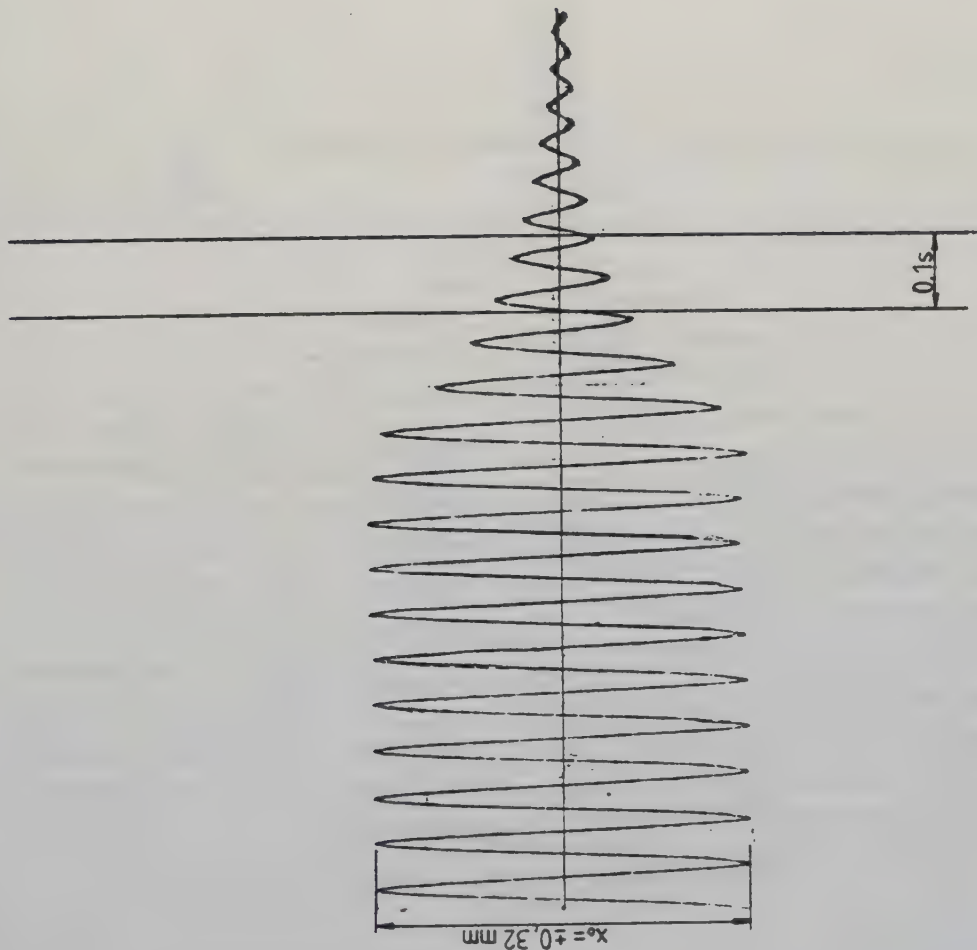
Geschwindigkeit [cm/s]



Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

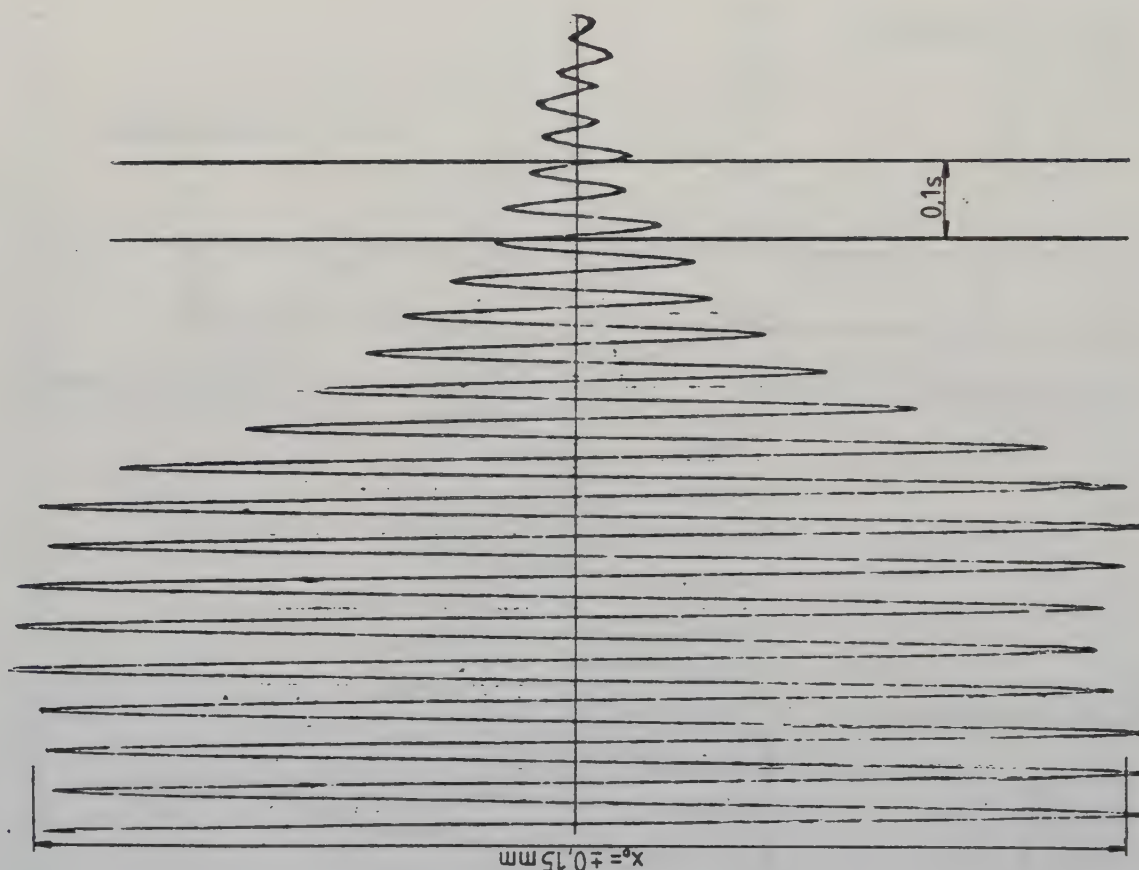
$f_0 = 18,2 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,204 \dots 0,102 \text{ mm}$   $D = 5,7\%$   
 $x_0 = 0,078 \dots 0,026 \text{ mm}$   $D = 5,2\%$



Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

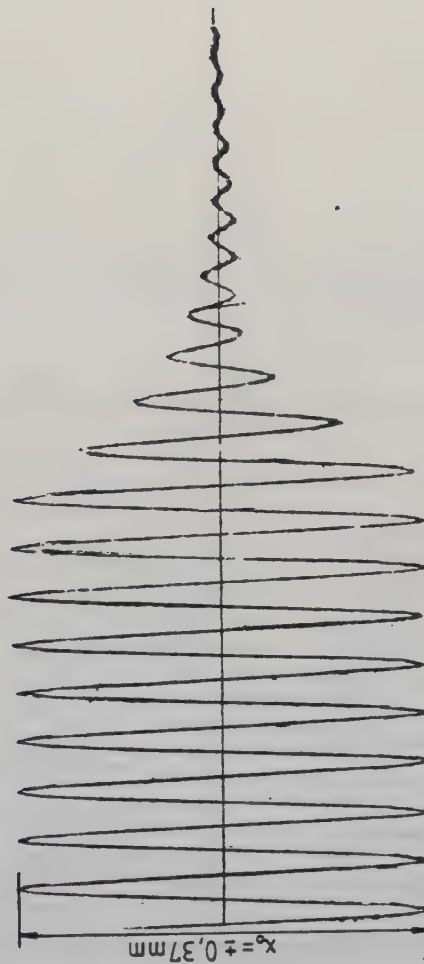
$f_0 = 19,3 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,126 \dots 0,078 \text{ mm}$   $D = 4,1\%$   
 $x_0 = 0,034 \dots 0,017 \text{ mm}$   $D = 5,3\%$



Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

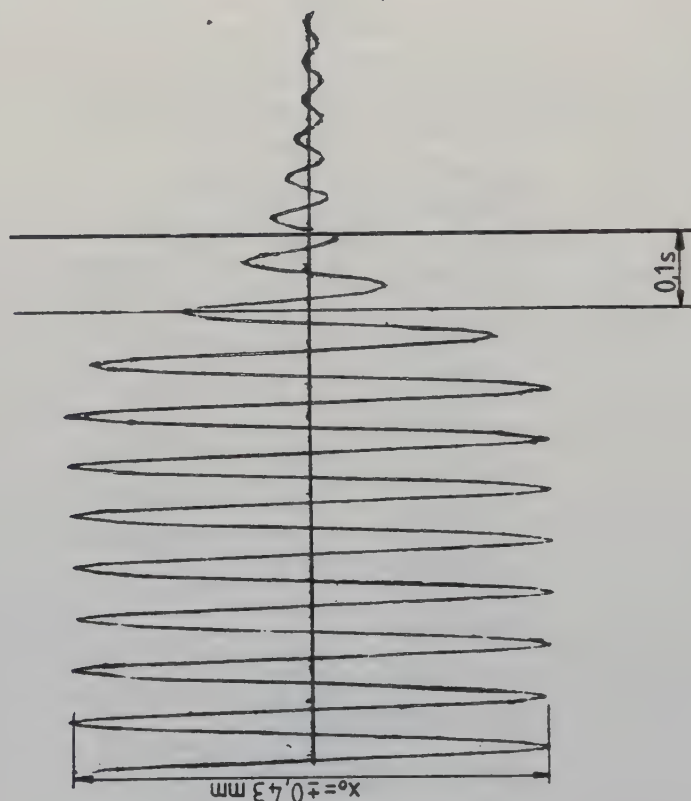
$f_0 = 17,6 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,260 \dots 0,090 \text{ mm}$   $D = 9,4\%$   
 $x_0 = 0,040 \dots 0,028 \text{ mm}$   $D = 5,2\%$



Messpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

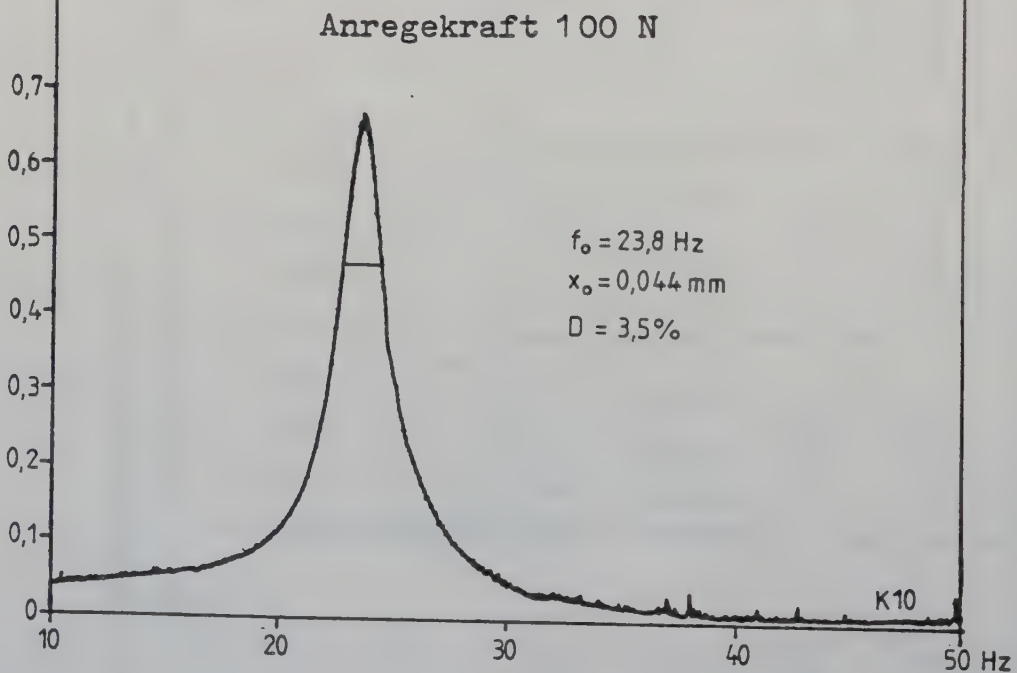
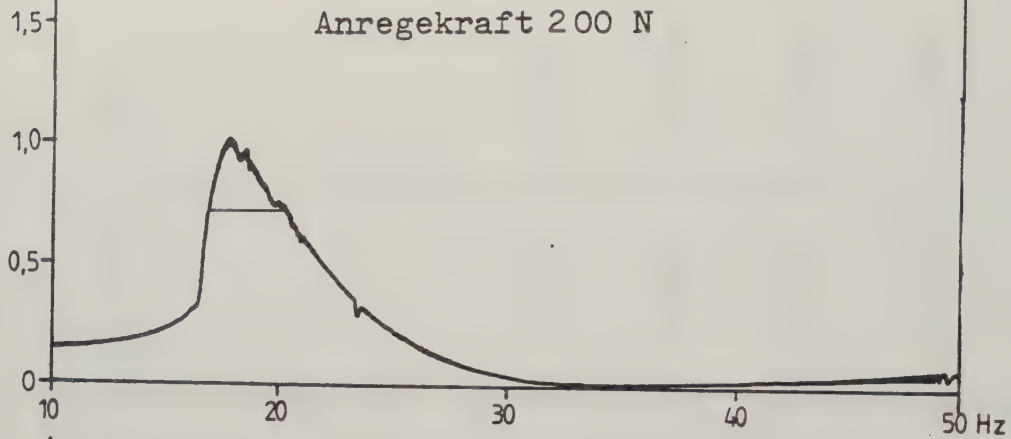
$f_0 = 16,9 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 0,330 \dots 0,056 \text{ mm}$ :  $D = 11,9\%$   
 $x_0 = 0,067 \dots 0,027 \text{ mm}$ :  $D = 5,5\%$



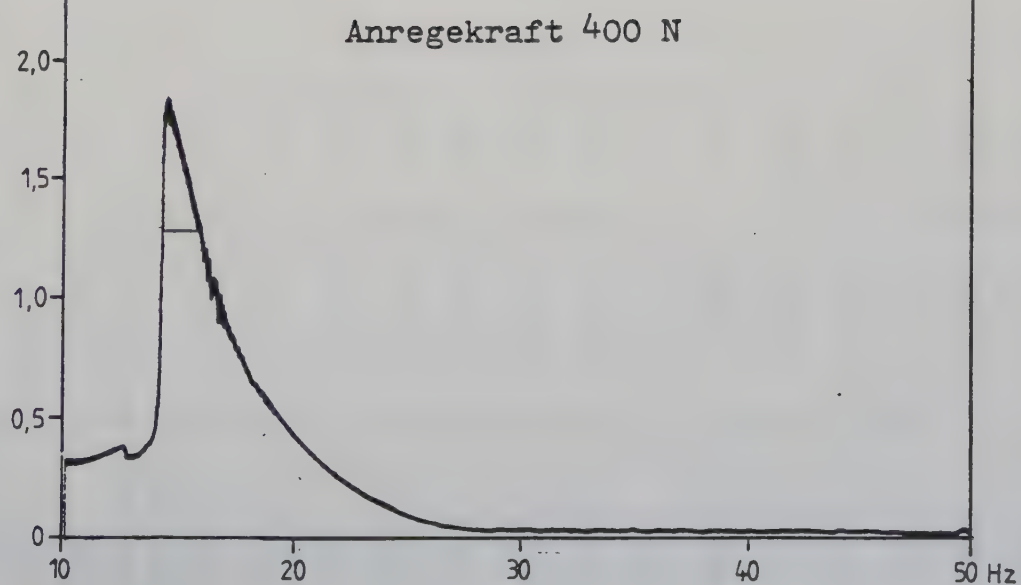
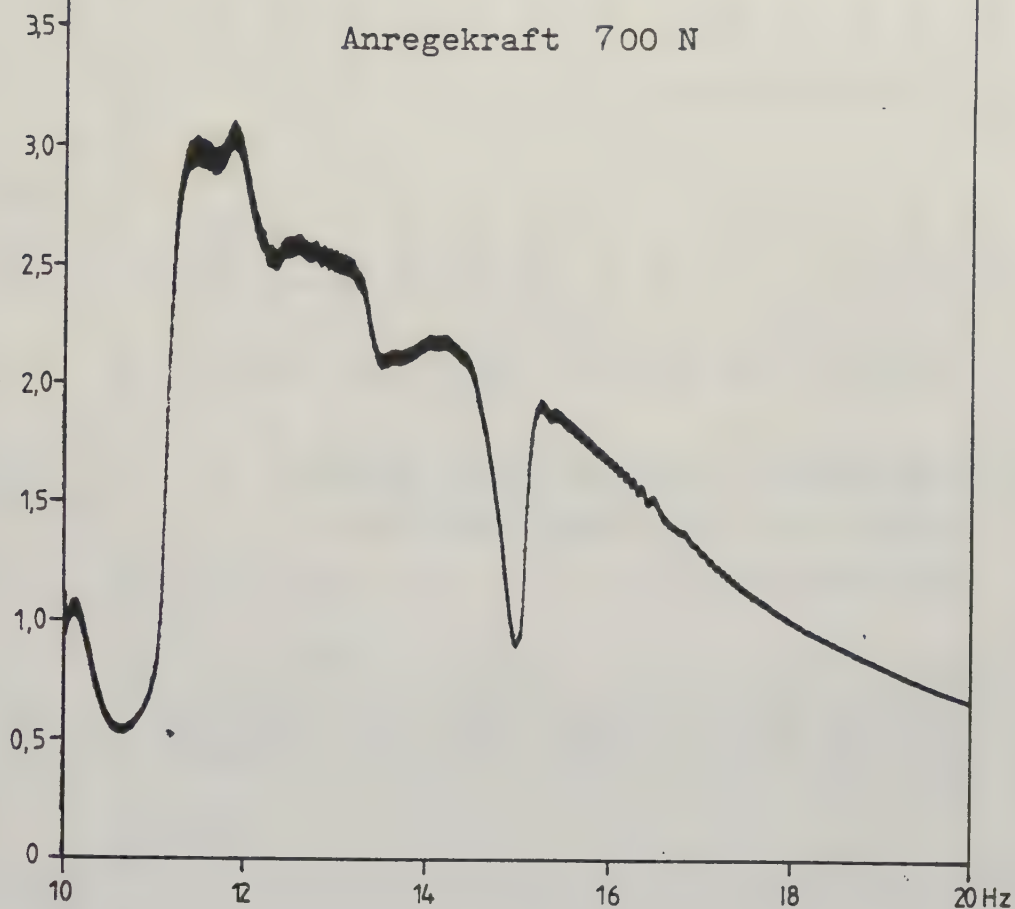
| - 187 -          |                 | 4.Kalksandsteinwand 24 cm (5. Vers.)<br>Wertetabelle<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                                       |                           |                   | Prüfaufbau<br>Variante 3        |                                 |
|------------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Anregekr.<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermatte                                                                                 |                                       |                           |                   | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |
|                  |                 | Frequenz<br>(Hz)                                                                           | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm) |                                 |                                 |
| 100              | 3,5*            | 23,8                                                                                       | 0,986                                 | 0,66                      | 0,044             | 0,030                           | 0,088                           |
| 200              | (10,7)          | 17,8                                                                                       | 1,130                                 | 1,01                      | 0,090             | 0,061                           | 0,198                           |
| 400              | (19,3)          | 14,6                                                                                       | 1,679                                 | 1,83                      | 0,199             | 0,128                           | 0,498                           |
| 700              | (31,9)          | 11,8                                                                                       | 2,283                                 | 3,08                      | 0,415             | 0,254                           | 0,990                           |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve  
( ): ausgerechneter Wert;  $K_1 = 5421 \text{ kg}$

Geschwindigkeit [cm/s]



Geschwindigkeit [cm/s]



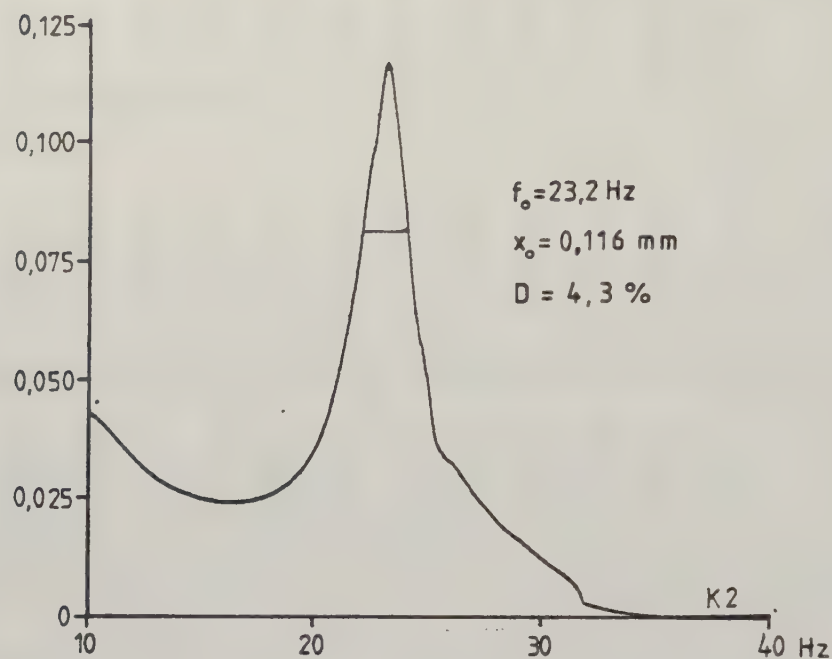
## 9.2 Stahlbetonwand

|                                                                                                                                               | Seite |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| a) Betonwand (1. und 2. Versuch), Wertetabelle,<br>Anregung über Fundamentblock, Anregung bei<br>angekoppeltem Erreger, Prüfaufbau Variante 2 | 191   |
| b) Betonwand (3. Versuch), Wertetabelle,<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger,<br>Prüfaufbau Variante 3                                      | 201   |
| c) Betonwand (4. bis 6. Versuch), Wertetabelle,<br>Anregung über Fundamentblock, Anregung bei<br>angekoppeltem Erreger, Prüfaufbau Variante 3 | 208   |

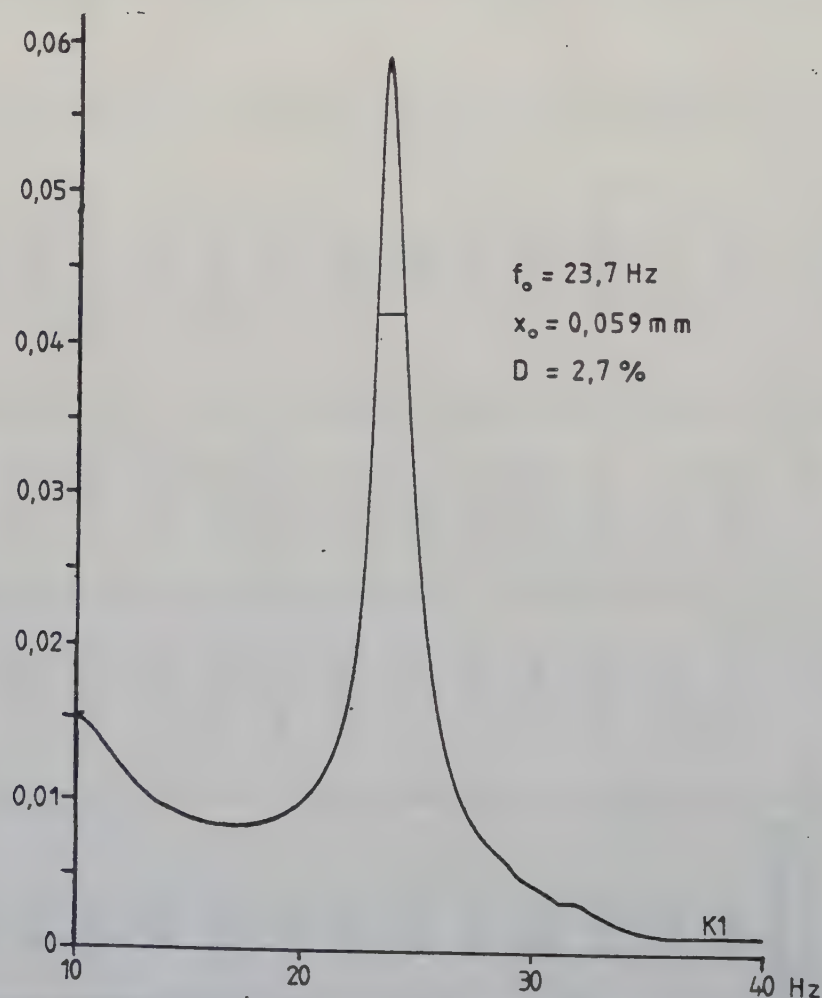
| - 191 -                           |                 | Betonwand (1./2. Versuch)<br>Wertetabelle<br>Anregung über Fundamentblock<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                                       |                           |                                 | Prüfaufbau<br>Variante 2        |  |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| Massenkraft<br>Schwingkopf<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermittle                                                                                                     |                                       |                           | Anregenkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |  |
|                                   |                 | Frequenz<br>(Hz)                                                                                                | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm)               |                                 |  |
| 310                               | 2,7*            | 23,7                                                                                                            | 1,308                                 | 0,879                     | 0,059                           | 0,115                           |  |
| 930                               | 4,3*            | 23,2                                                                                                            | 2,465                                 | 1,691                     | 0,116                           | 0,201                           |  |
| Anregerkraft                      |                 |                                                                                                                 |                                       |                           |                                 |                                 |  |
| 100                               | 2,5*            | 23,8                                                                                                            | 1,140                                 | 0,763                     | 0,051                           | 0,100                           |  |
| 100                               | 2,5*            | 23,7                                                                                                            | 1,175                                 | 0,789                     | 0,053                           | 0,104                           |  |
| 200                               | 2,7*            | 23,3                                                                                                            | 2,208                                 | 1,508                     | 0,103                           | 0,199                           |  |
| 300                               | 3,3*            | 22,8                                                                                                            | 3,735                                 | 2,607                     | 0,182                           | 0,332                           |  |
| 100                               | 2,5*            | 23,3                                                                                                            | 1,329                                 | 0,908                     | 0,062                           | 0,118                           |  |
| 400                               | 3,9*            | 22,0                                                                                                            | 4,796                                 | 3,470                     | 0,251                           | 0,449                           |  |
| 500                               | 4,3*            | 21,0                                                                                                            | 6,268                                 | 4,750                     | 0,360                           | 0,650                           |  |
| 700                               | 4,3*            | 19,5                                                                                                            | 9,607                                 | 7,841                     | 0,640                           | 1,080                           |  |
| 1000                              | 4,4*            | 18,7                                                                                                            | 13,667                                | 11,632                    | 0,990                           | 1,650                           |  |
| 100                               | 3,0*            | 21,5                                                                                                            | 1,350                                 | 1,000                     | 0,074                           | 0,129                           |  |
| 1500                              | 4,2*            | 17,8                                                                                                            | 18,137                                | 16,217                    | 1,450                           | 2,330                           |  |
| 500                               | 2,6*            | 19,3                                                                                                            | 6,882                                 | 5,675                     | 0,468                           | 0,765                           |  |
| 2000                              | 4,5*            | 16,7                                                                                                            | 22,615                                | 21,552                    | 2,054                           | 3,250                           |  |
| 3000                              | 7,7*            | 15,6                                                                                                            | 28,390                                | 28,964                    | 2,955                           | 4,450                           |  |
| 500                               | 3,6*            | 17,3                                                                                                            | 7,385                                 | 6,794                     | 0,625                           | 0,905                           |  |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve

2. Durchlauf (K2): Massenkraft in Schwingkopfhöhe 930 N



1. Durchlauf (K1): Massenkraft in Schwingkopfhöhe 310 N

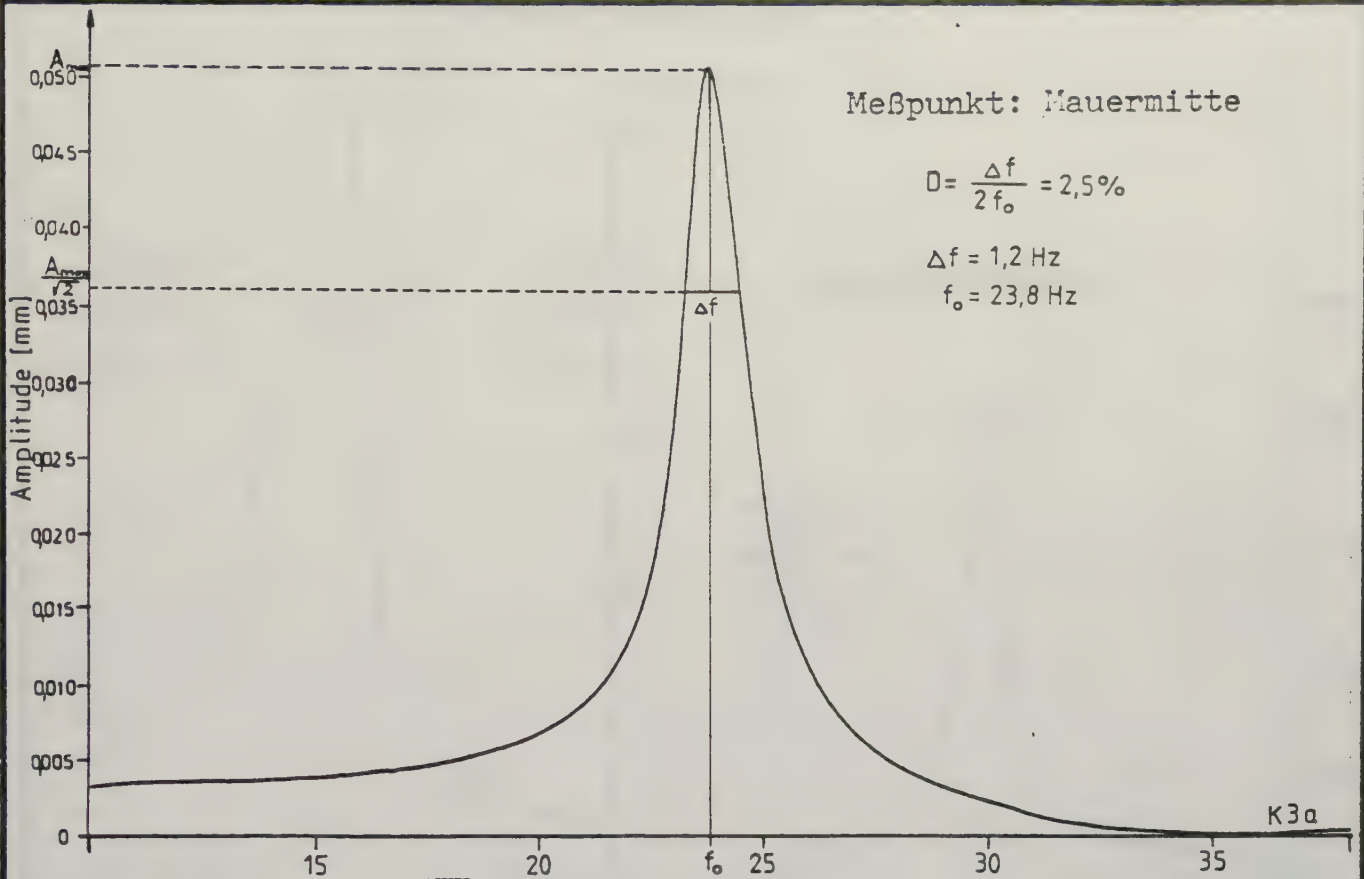


Meßpunkt: Mauermitte

$$D = \frac{\Delta f}{2 f_0} = 2,5\%$$

$$\Delta f = 1,2 \text{ Hz}$$

$$f_0 = 23,8 \text{ Hz}$$

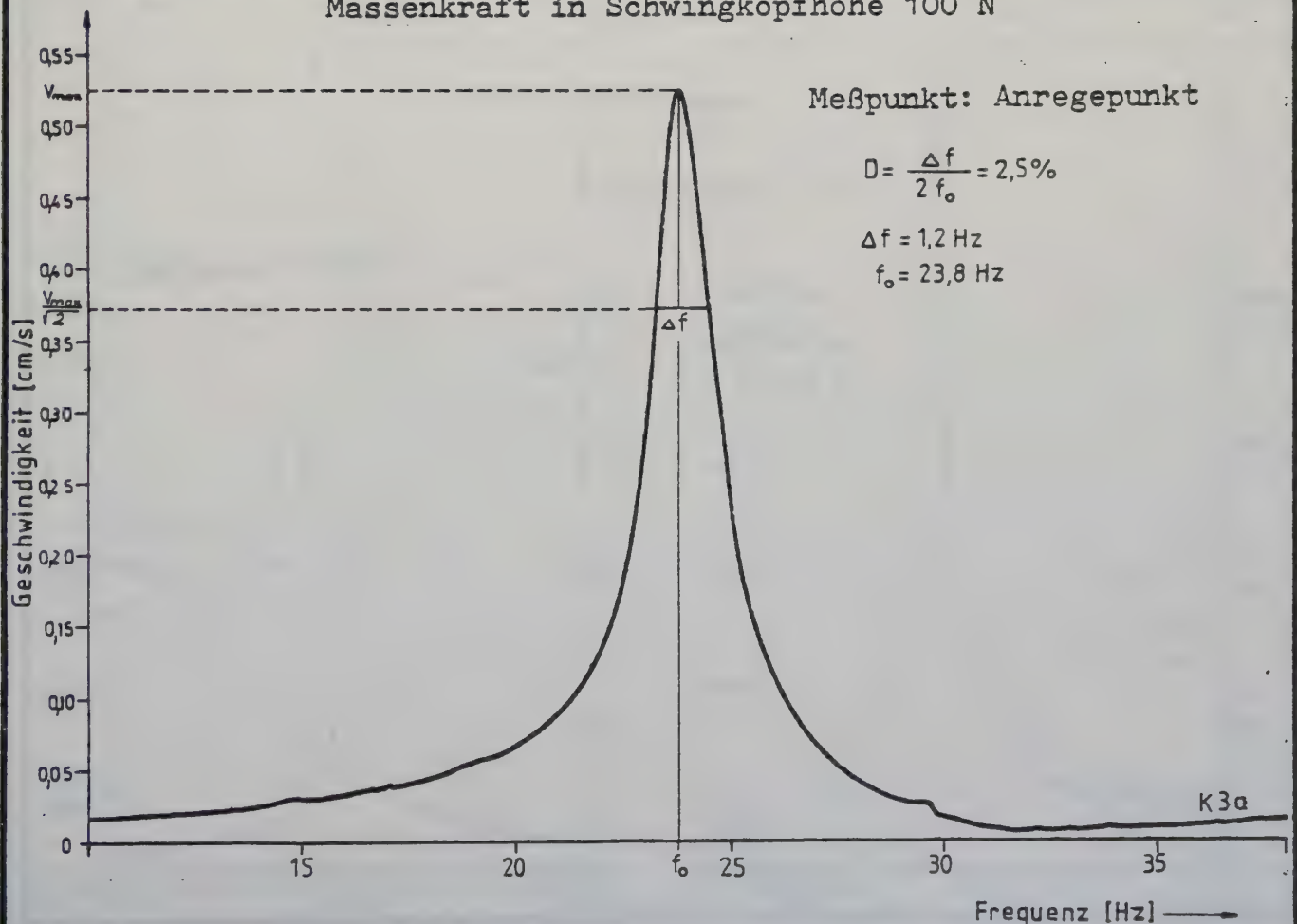


Meßpunkt: Anregepunkt

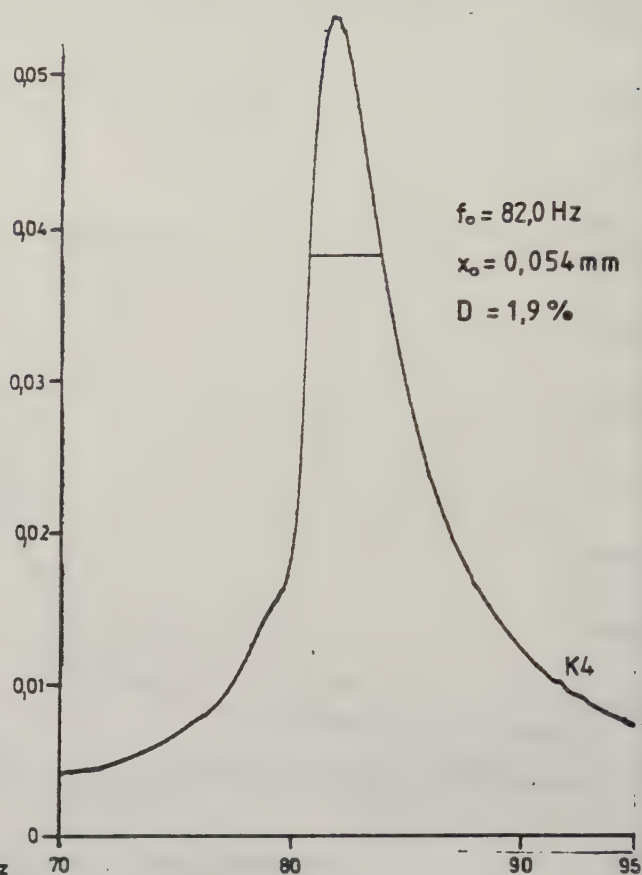
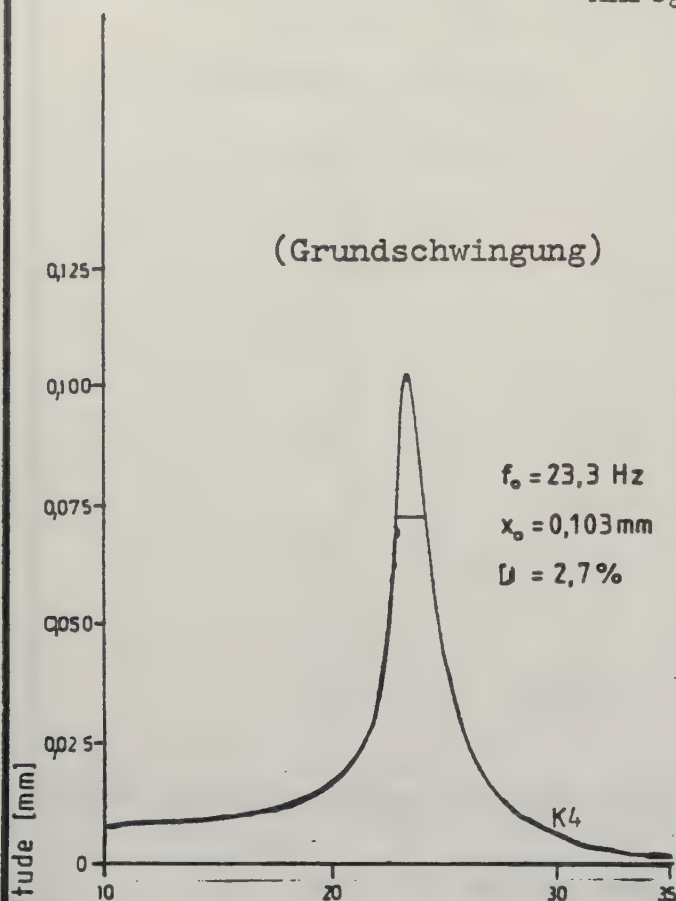
$$D = \frac{\Delta f}{2 f_0} = 2,5\%$$

$$\Delta f = 1,2 \text{ Hz}$$

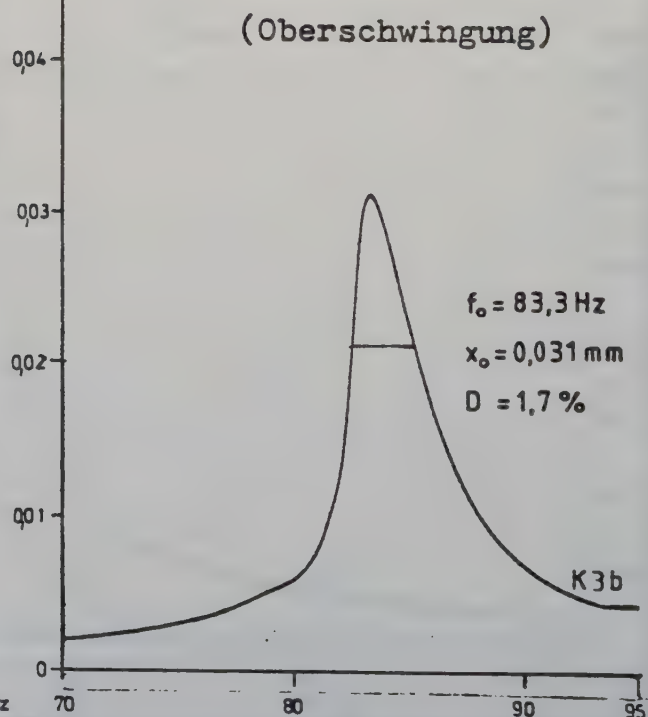
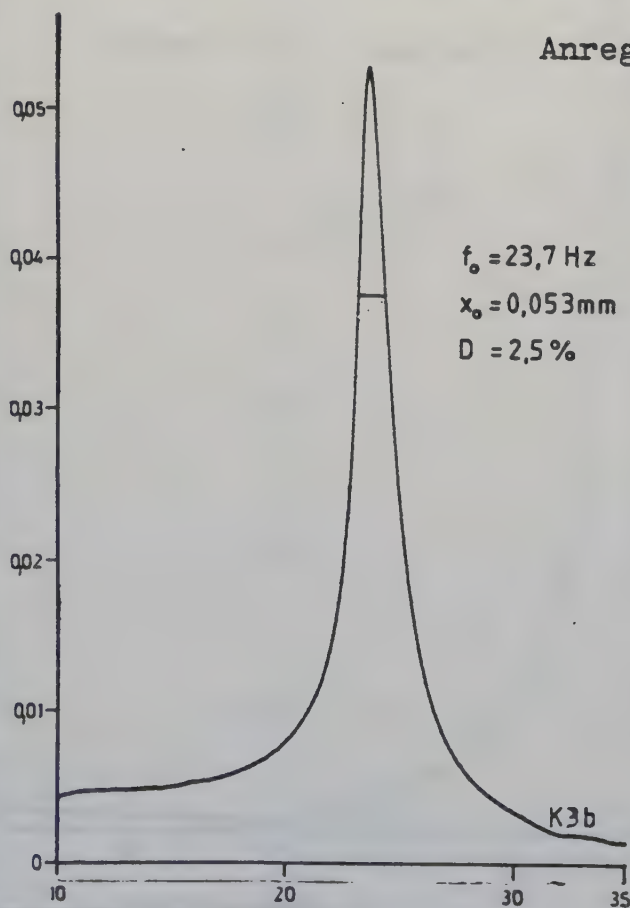
$$f_0 = 23,8 \text{ Hz}$$



Anregekraft 200 N

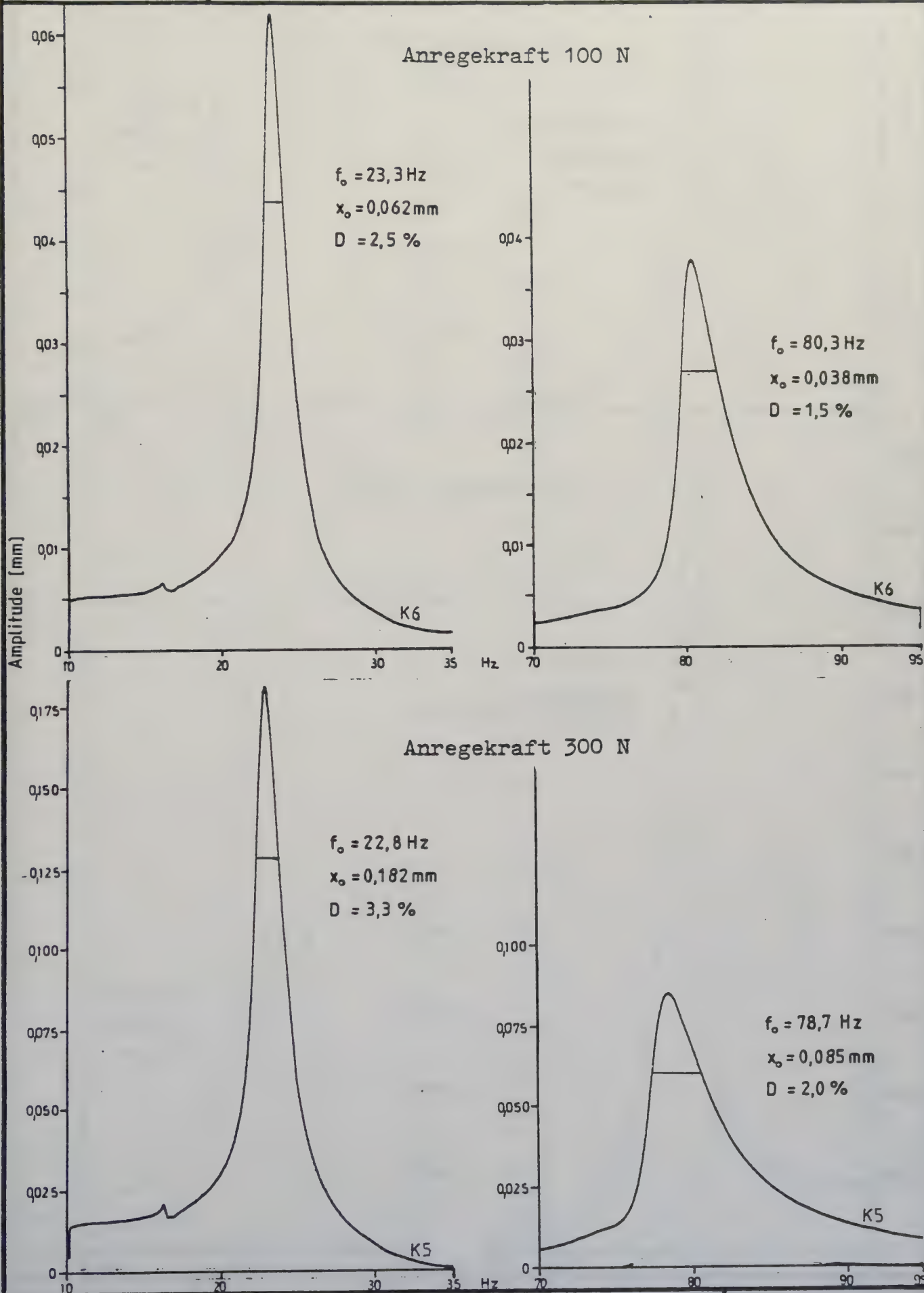


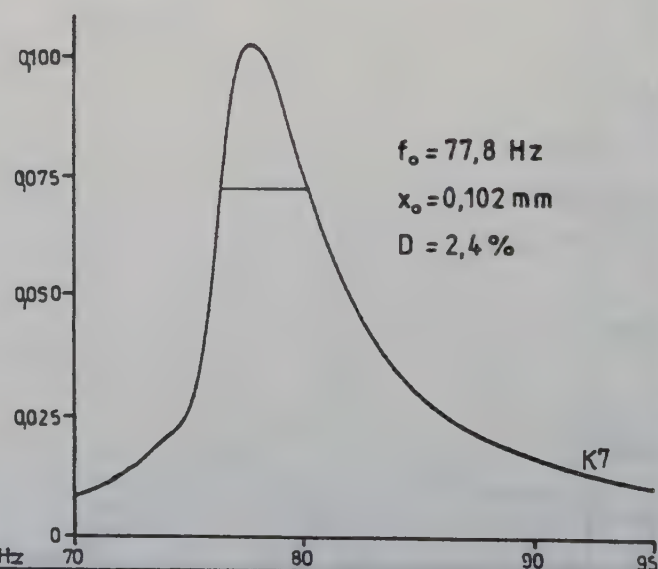
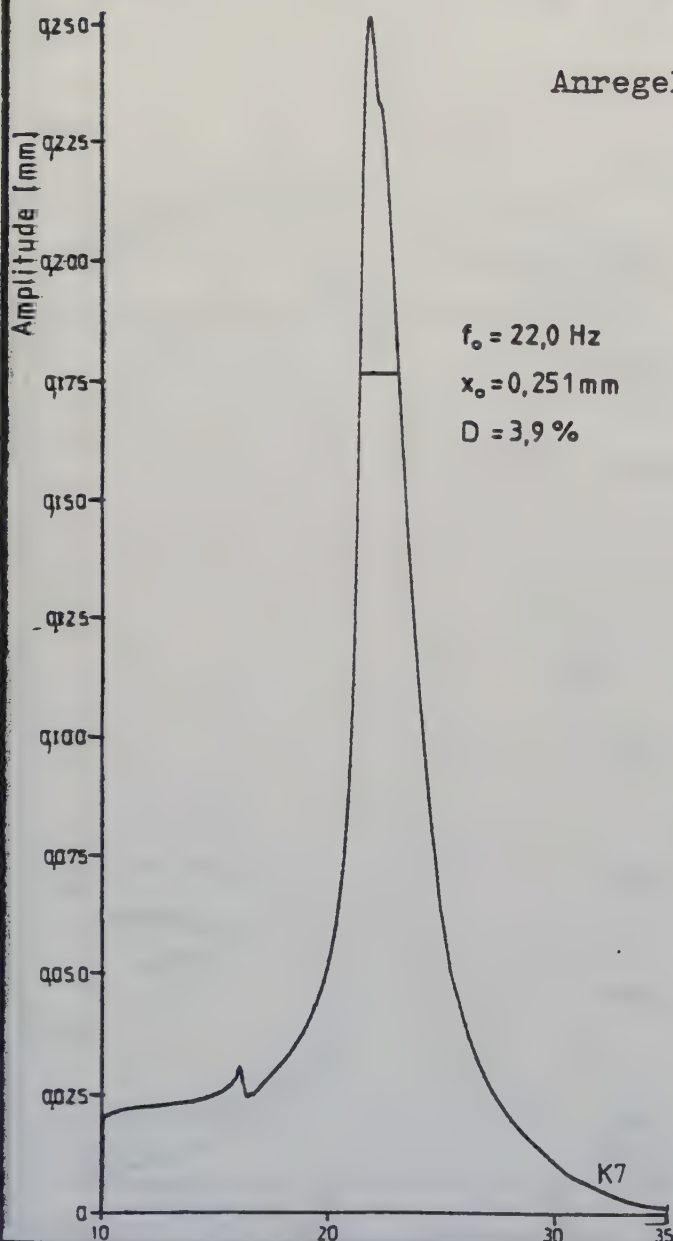
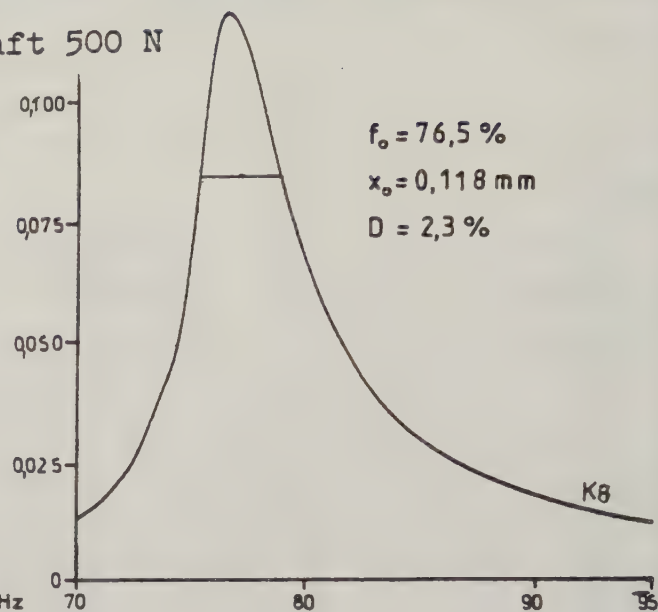
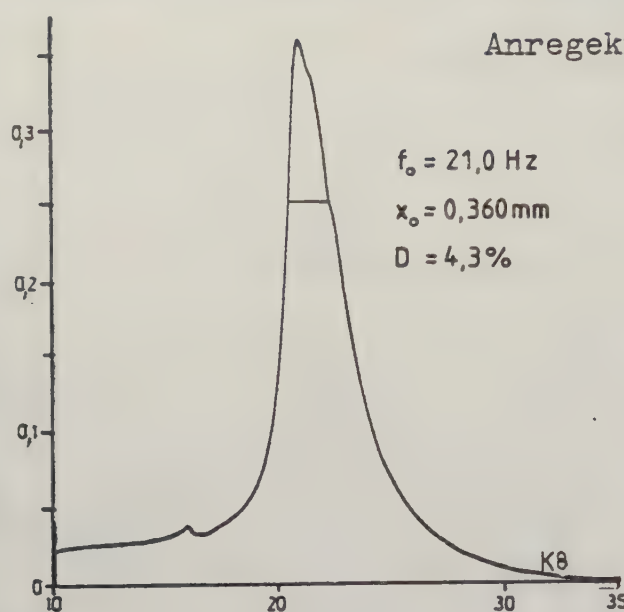
Anregekraft 100 N

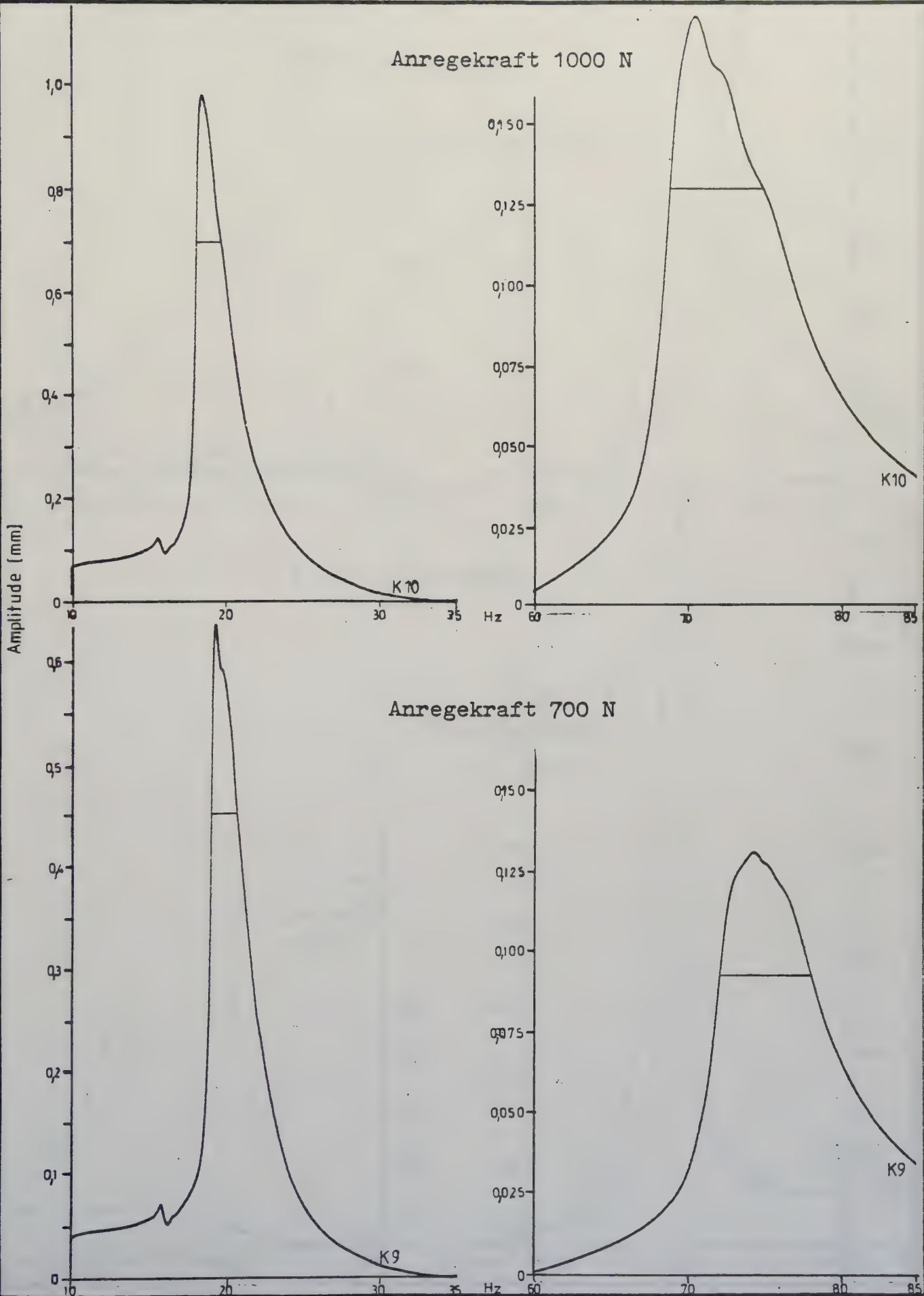


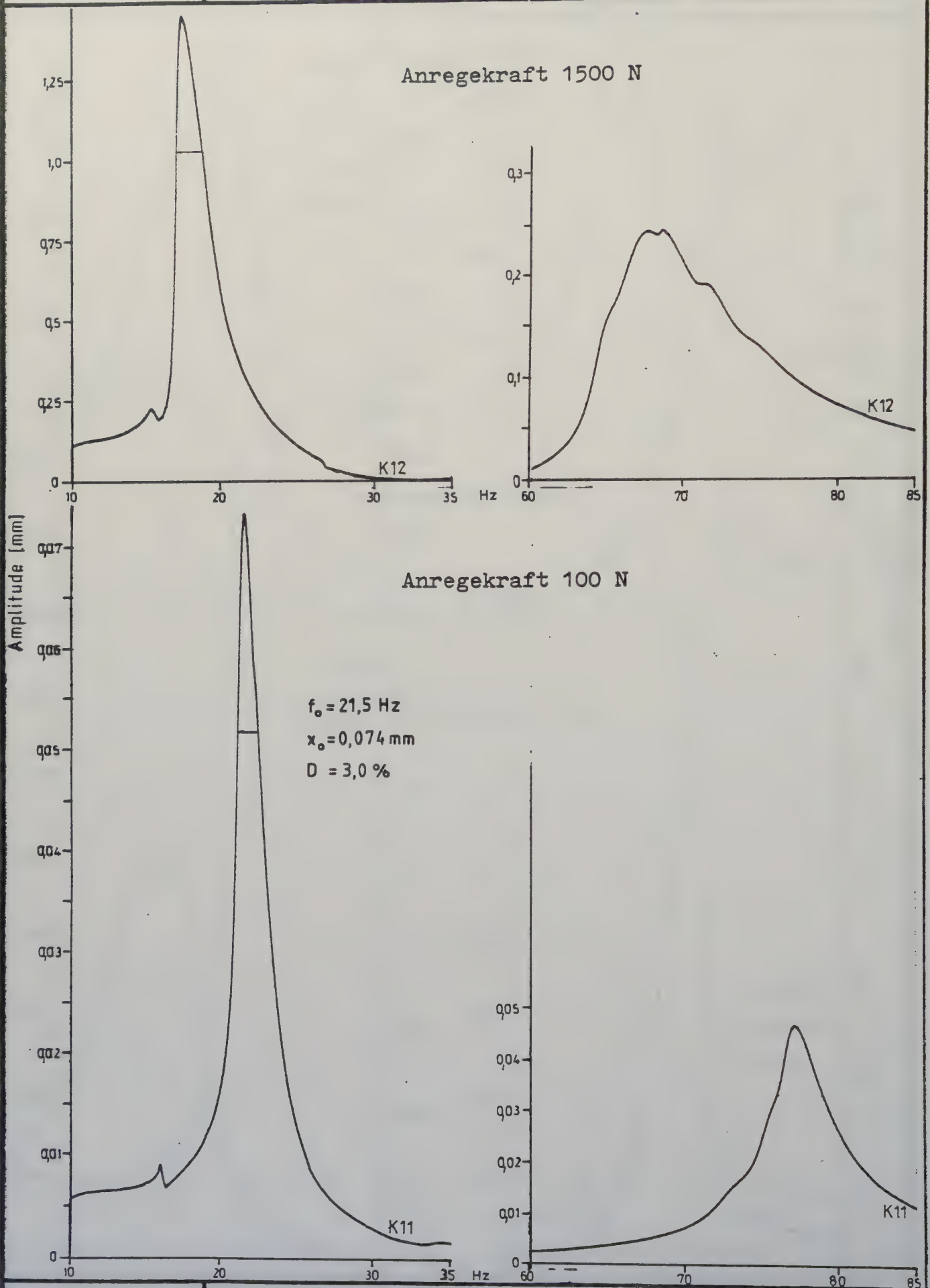
Betonwand 11,5 cm (2.Versuch)  
Resonanzkurven  
Anregung bei angekoppeltem Erreger

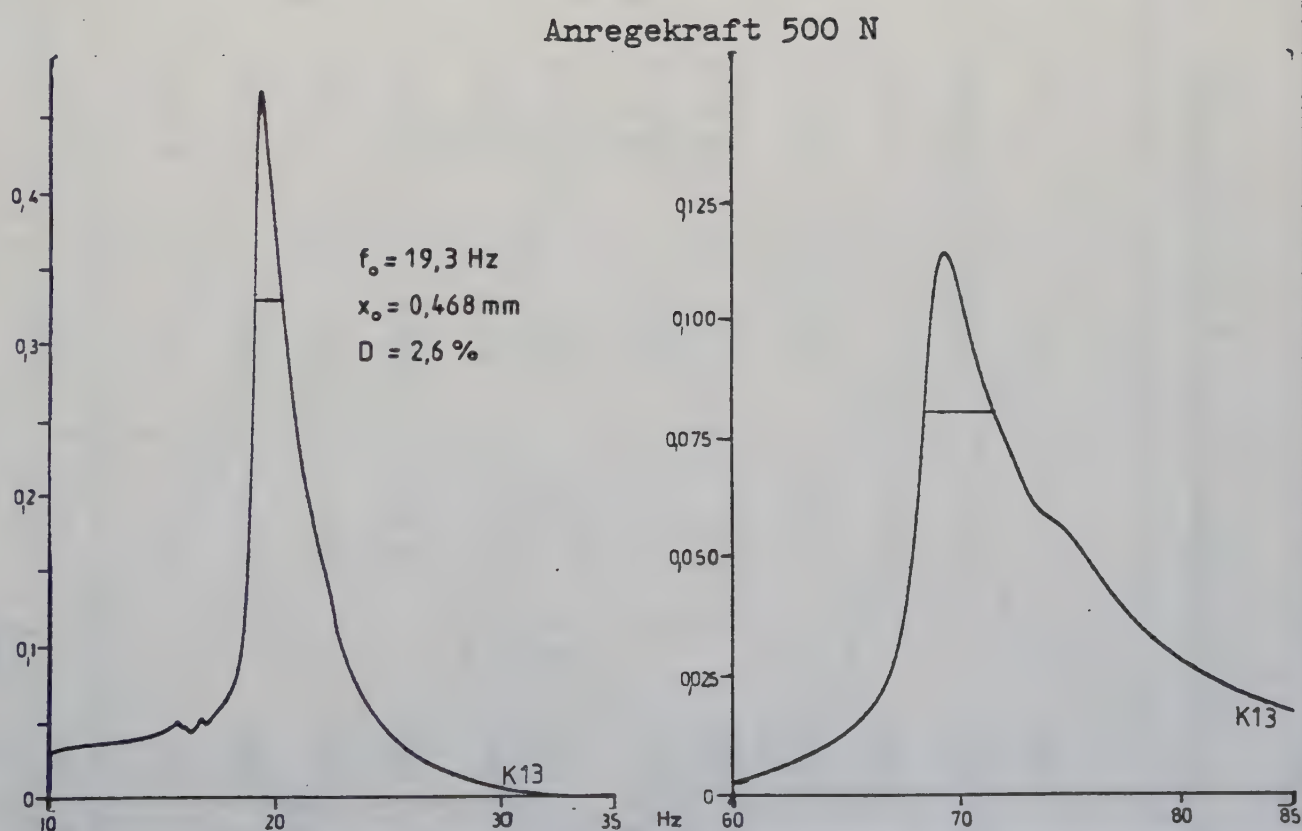
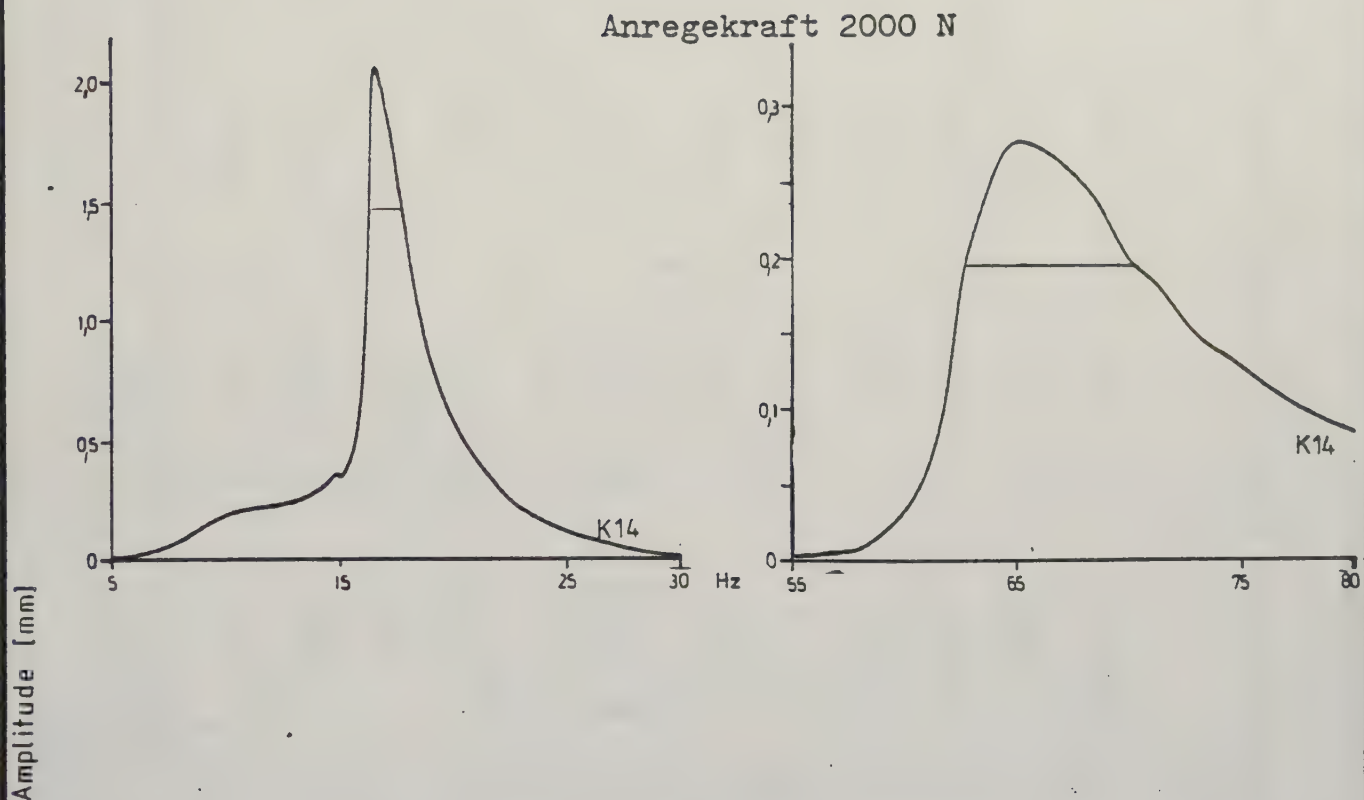
Prüfaufbau  
Variante 2

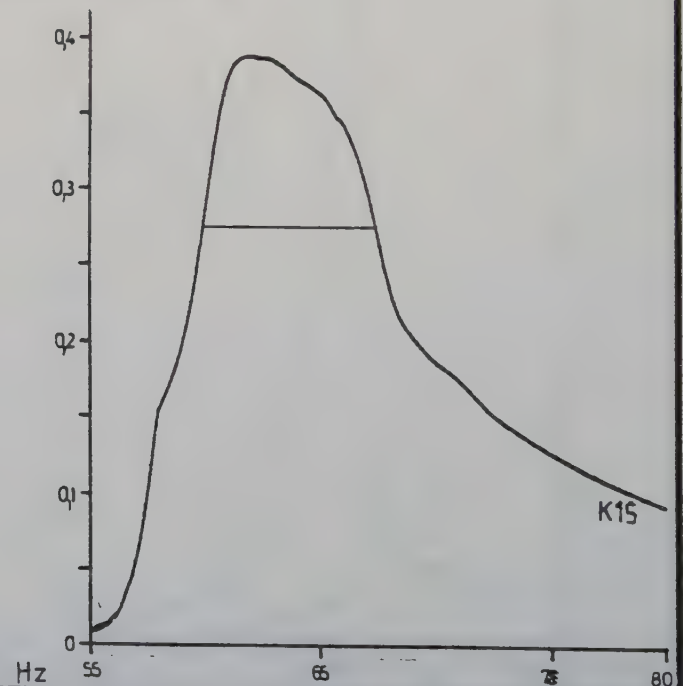
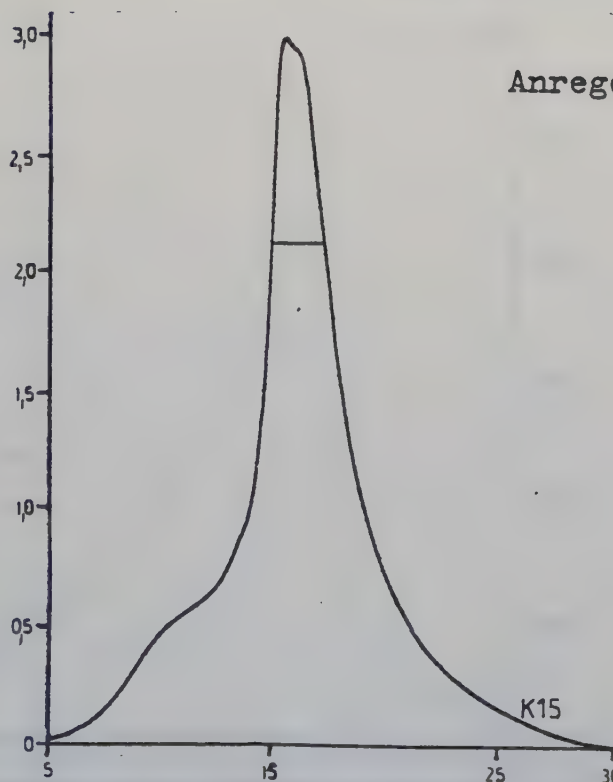
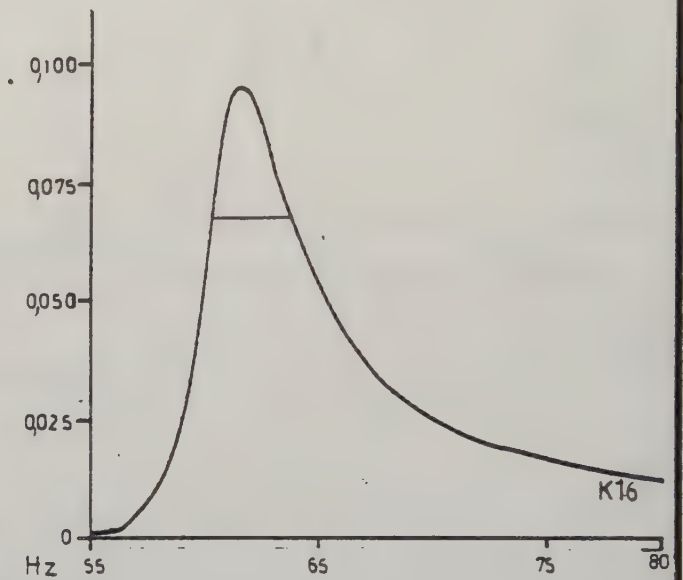
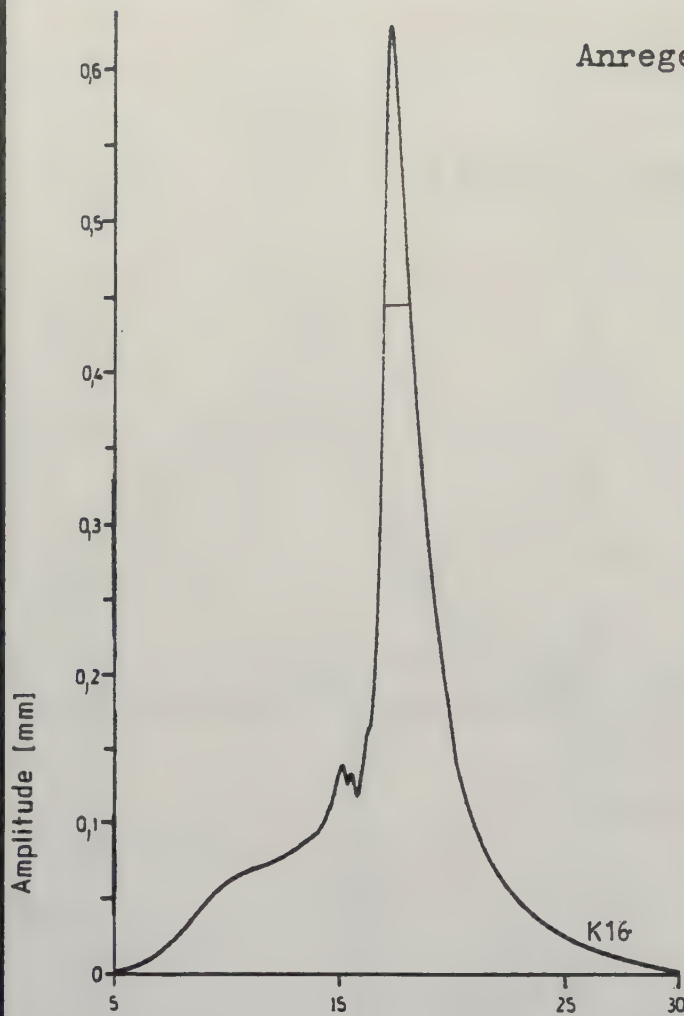












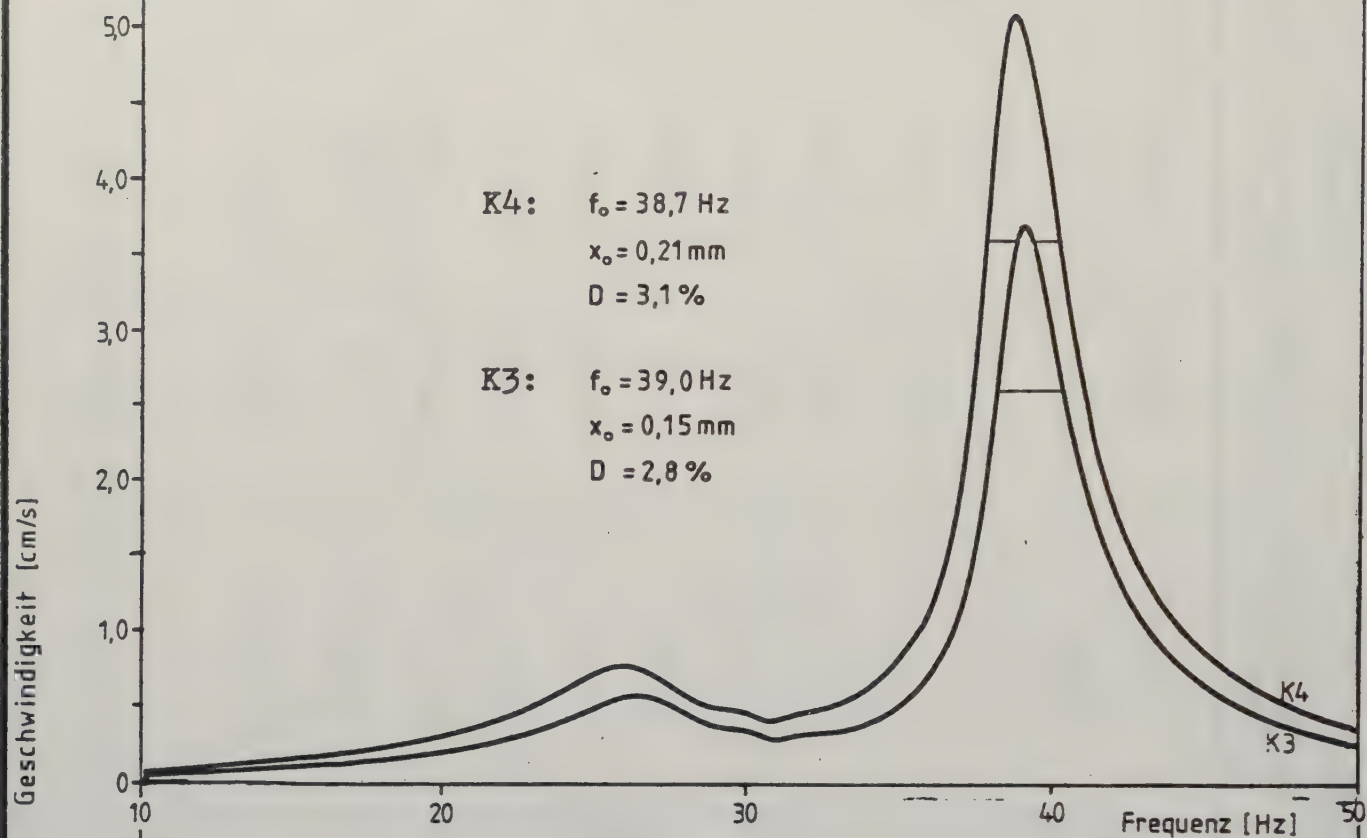
| - 201 -            |                 | Betonwand(3. Versuch)<br>Wertetabelle<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                                       |                           |                                 | Prüfaufbau<br>Variante 3        |       |
|--------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------|
| Anregekraft<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermittle                                                                 |                                       |                           | Anregenkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Mauerkrone<br>Amplitude<br>(mm) |       |
|                    |                 | Frequenz<br>(Hz)                                                            | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) | Amplitude<br>(mm)               |                                 |       |
| 100                | 2,4*            | 39,9                                                                        | 2,640                                 | 1,05                      | 0,042                           | 0,033                           | 0,031 |
| 200                | 2,7*            | 39,3                                                                        | 5,548                                 | 2,25                      | 0,091                           | 0,071                           | 0,063 |
| 300                | 2,8*            | 39,0                                                                        | 9,127                                 | 3,73                      | 0,152                           | 0,110                           | 0,102 |
| 400                | 3,1*            | 38,7                                                                        | 12,475                                | 5,13                      | 0,211                           | 0,156                           | 0,138 |
| 500                | 3,3*            | 37,9                                                                        | 15,027                                | 6,31                      | 0,265                           | 0,196                           | 0,170 |
| 700                | 3,8*            | 37,3                                                                        | 19,334                                | 8,25                      | 0,352                           | 0,284                           | 0,235 |
| 1000               | 3,9*            | 36,5                                                                        | 29,085                                | 12,68                     | 0,553                           | 0,453                           | 0,339 |
| 1500               | 4,3*            | 35,4                                                                        | 47,866                                | 21,52                     | 0,968                           | 0,731                           | 0,492 |
| 2000               | 3,2*            | 34,0                                                                        | 70,509                                | 33,01                     | 1,545                           | 1,147                           | 0,722 |
| 3000               | 6,3*            | 31,3                                                                        | 116,030                               | 59,00                     | 3,000                           | 2,259                           | 1,185 |
| 4000               | (8,4)           | 28,6                                                                        | 133,882                               | 74,50                     | 4,146                           | 2,906                           | 1,323 |
| 5000               | (7,8)           | 23,7                                                                        | 174,226                               | 117,00                    | 7,857                           | 5,686                           | 1,571 |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve

( ): ausgerechneter Wert;  $K_{10} = 1030 \text{ kg}$

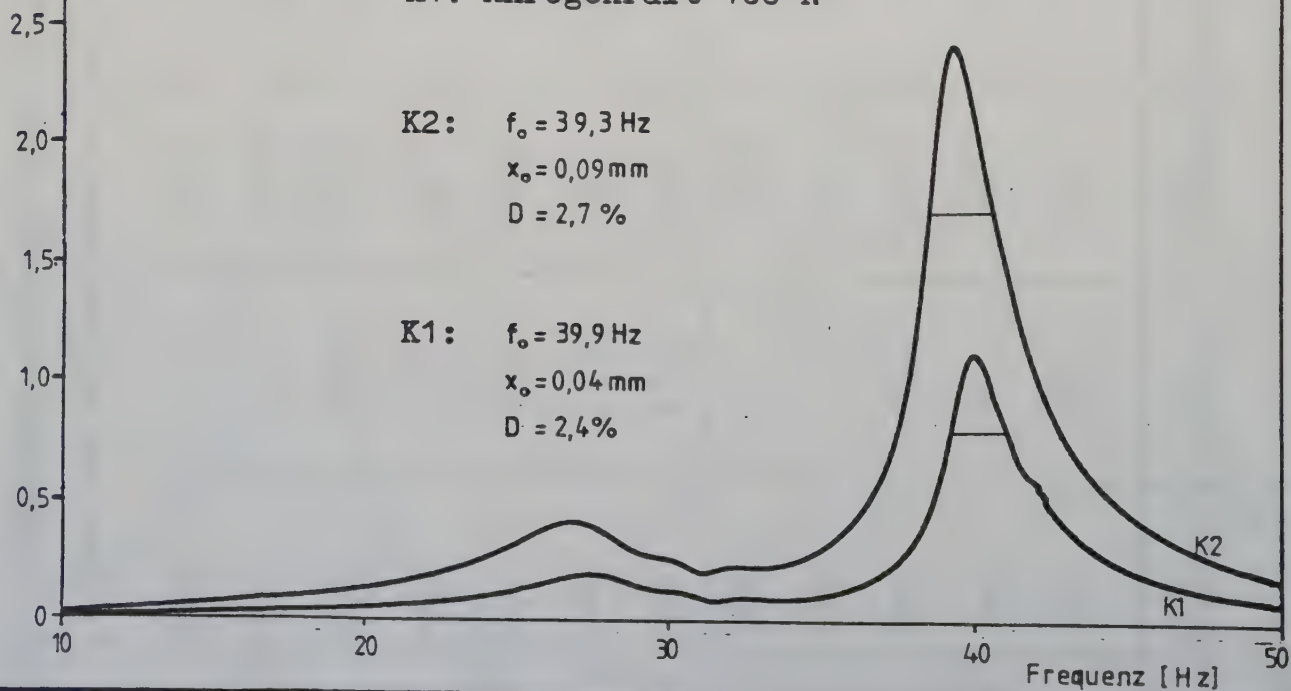
K4: Anregekraft 400 N

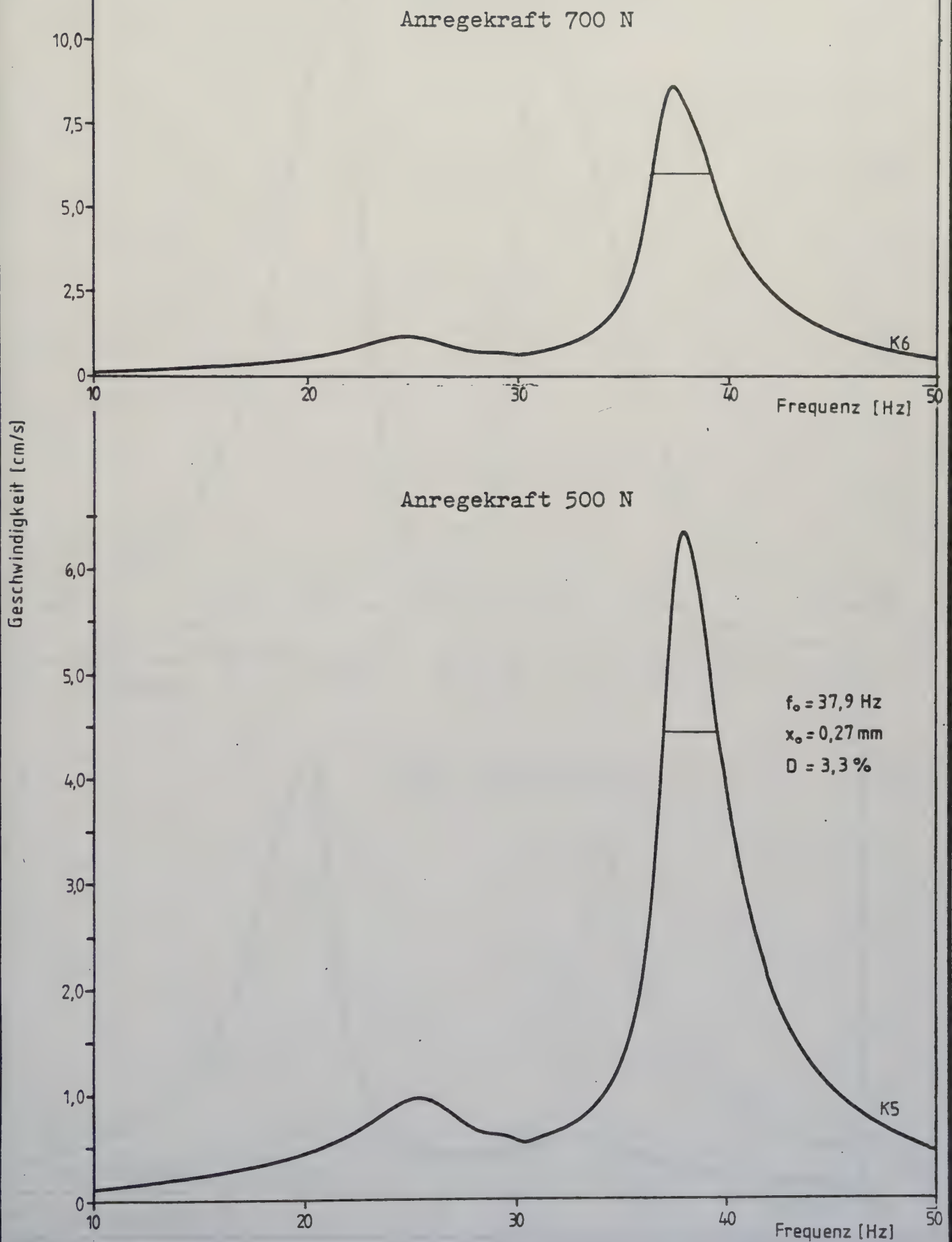
K3: Anregekraft 300 N

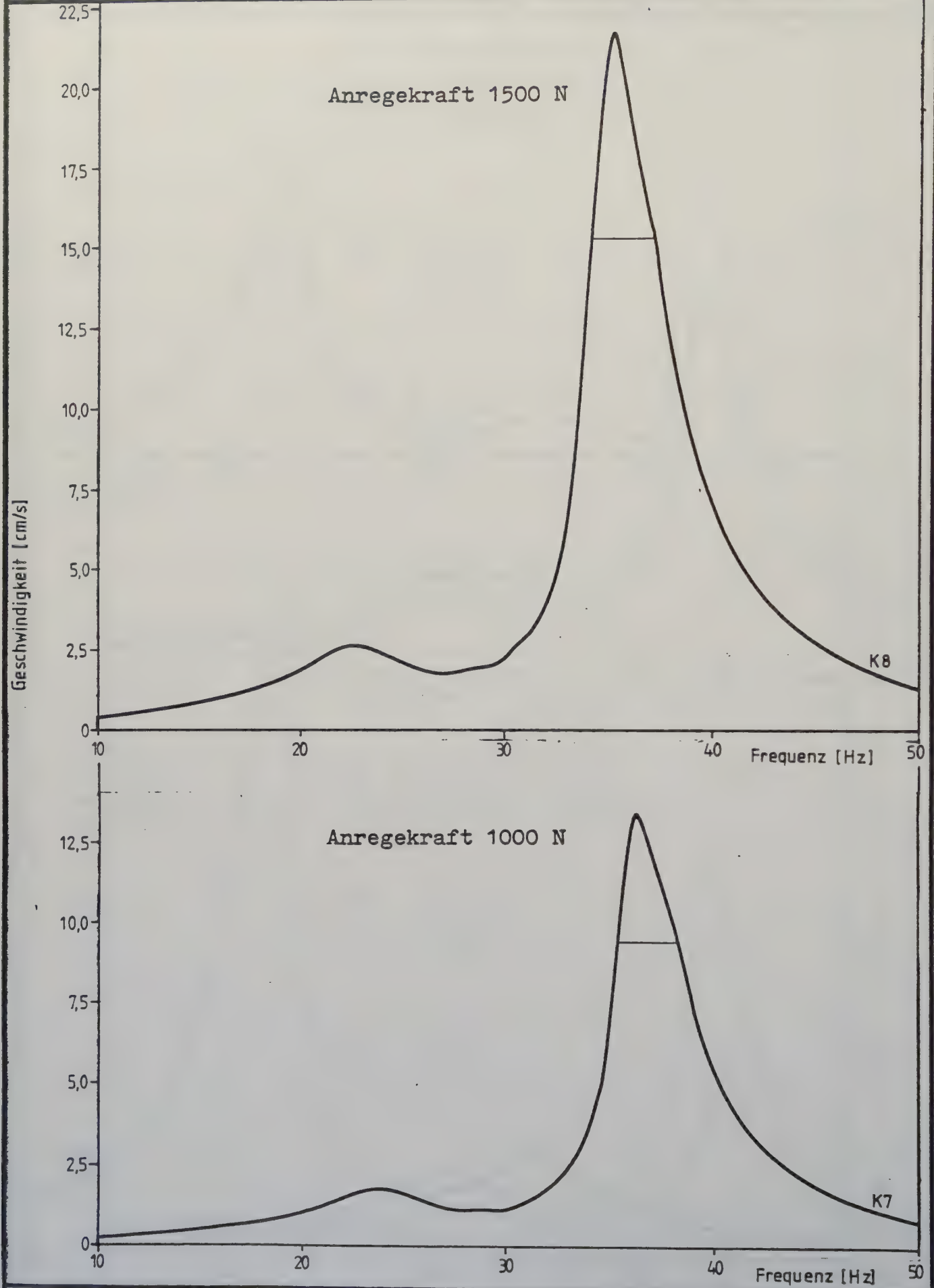


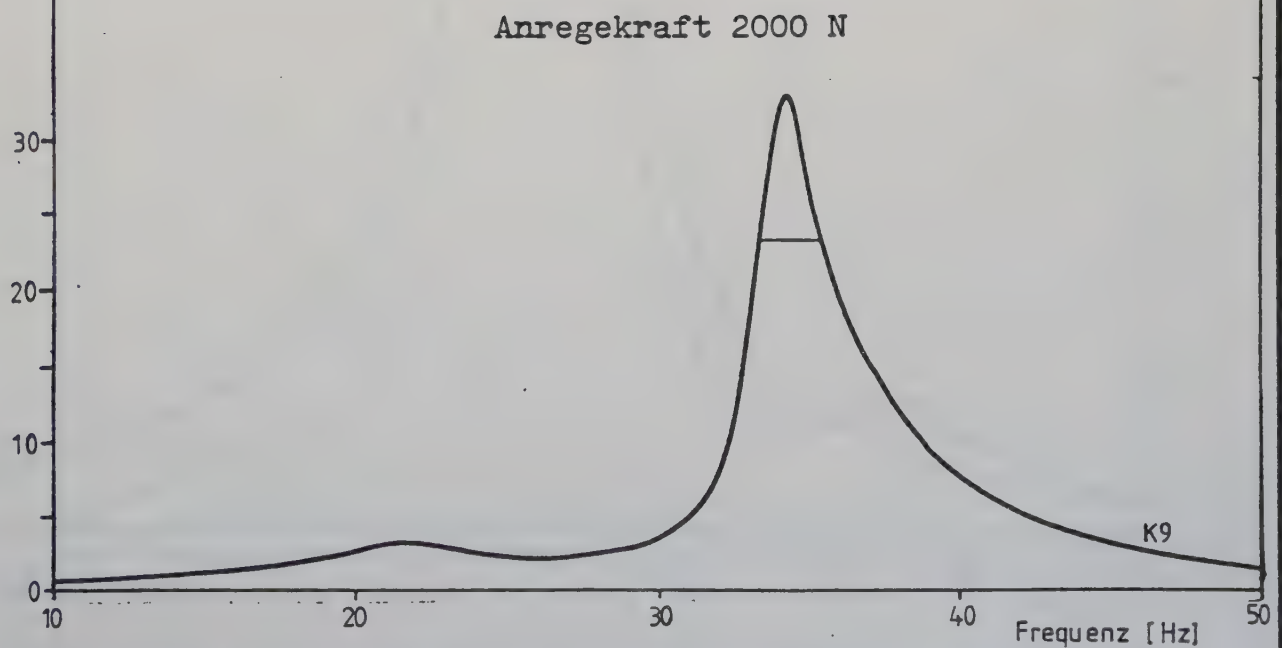
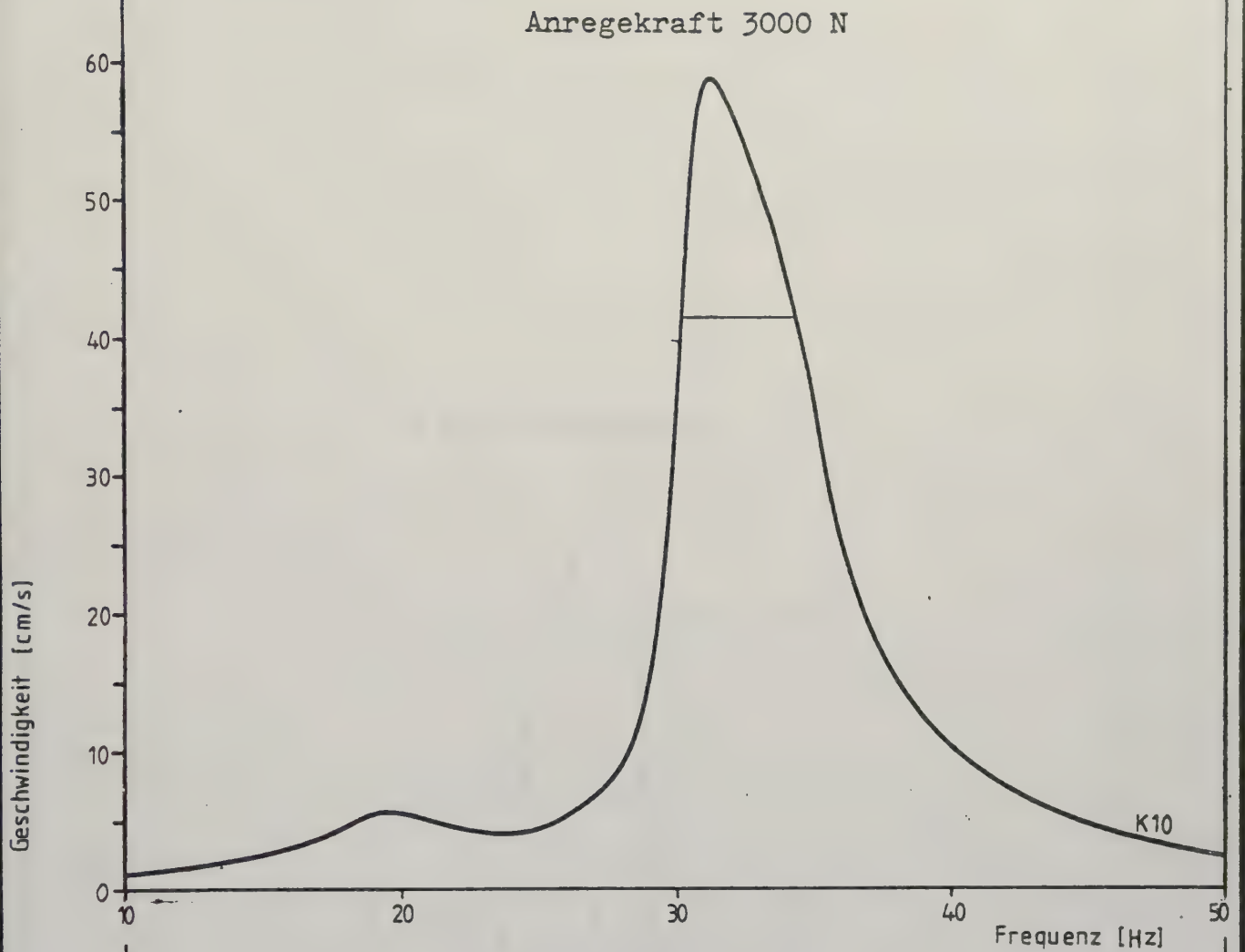
K2: Anregekraft 200 N

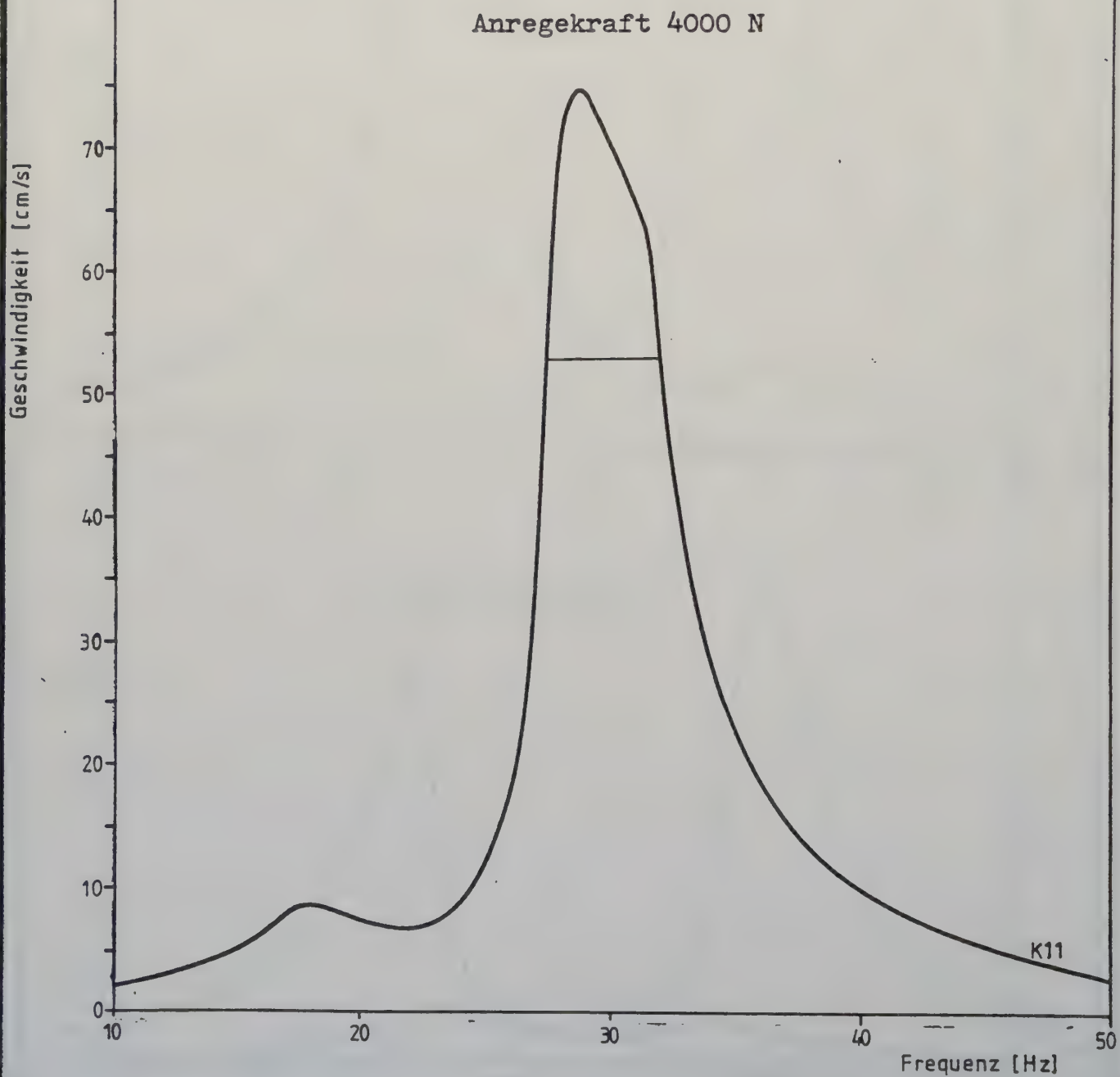
K1: Anregekraft 100 N





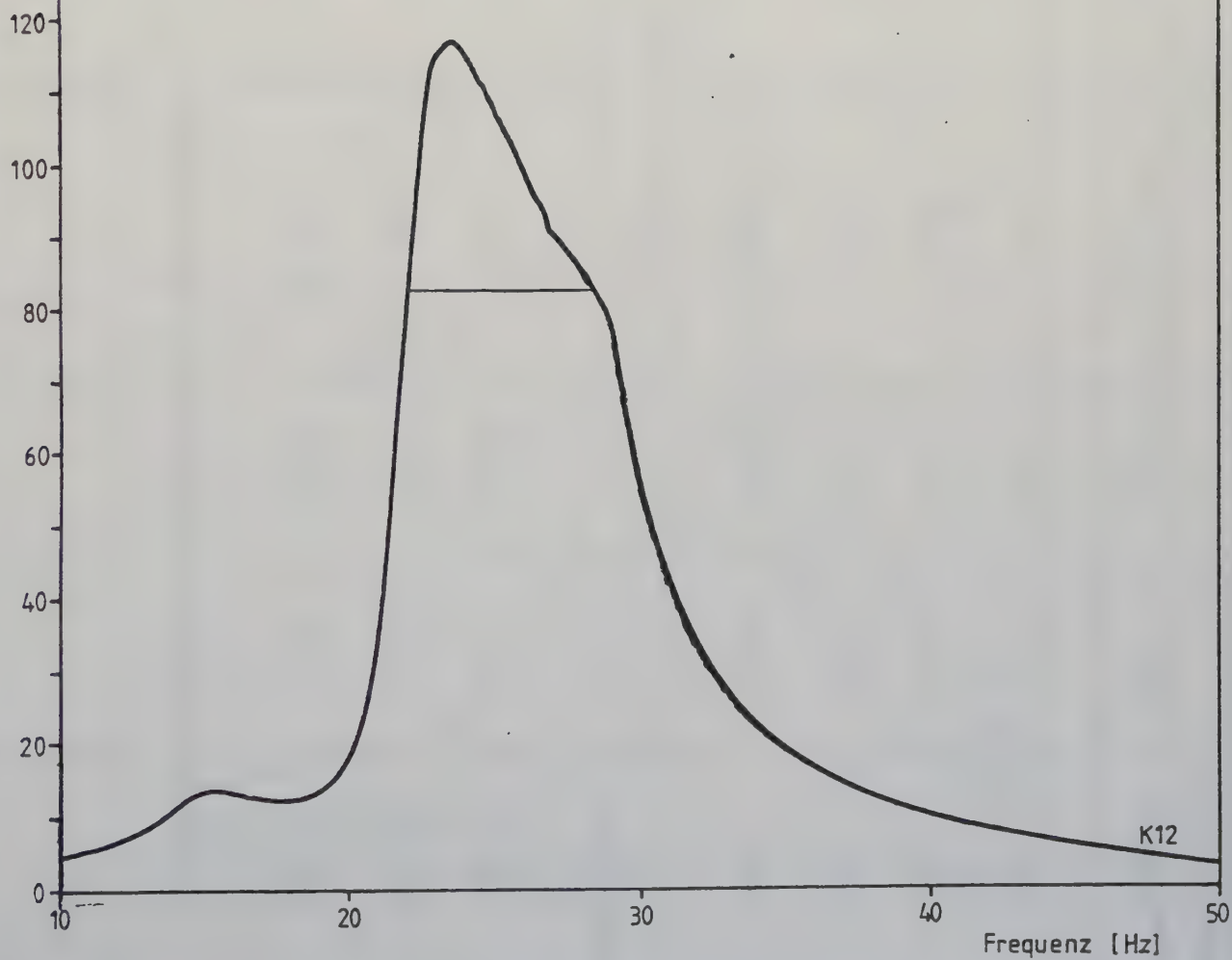






Geschwindigkeit [cm/s]

Anregekraft 5000 N



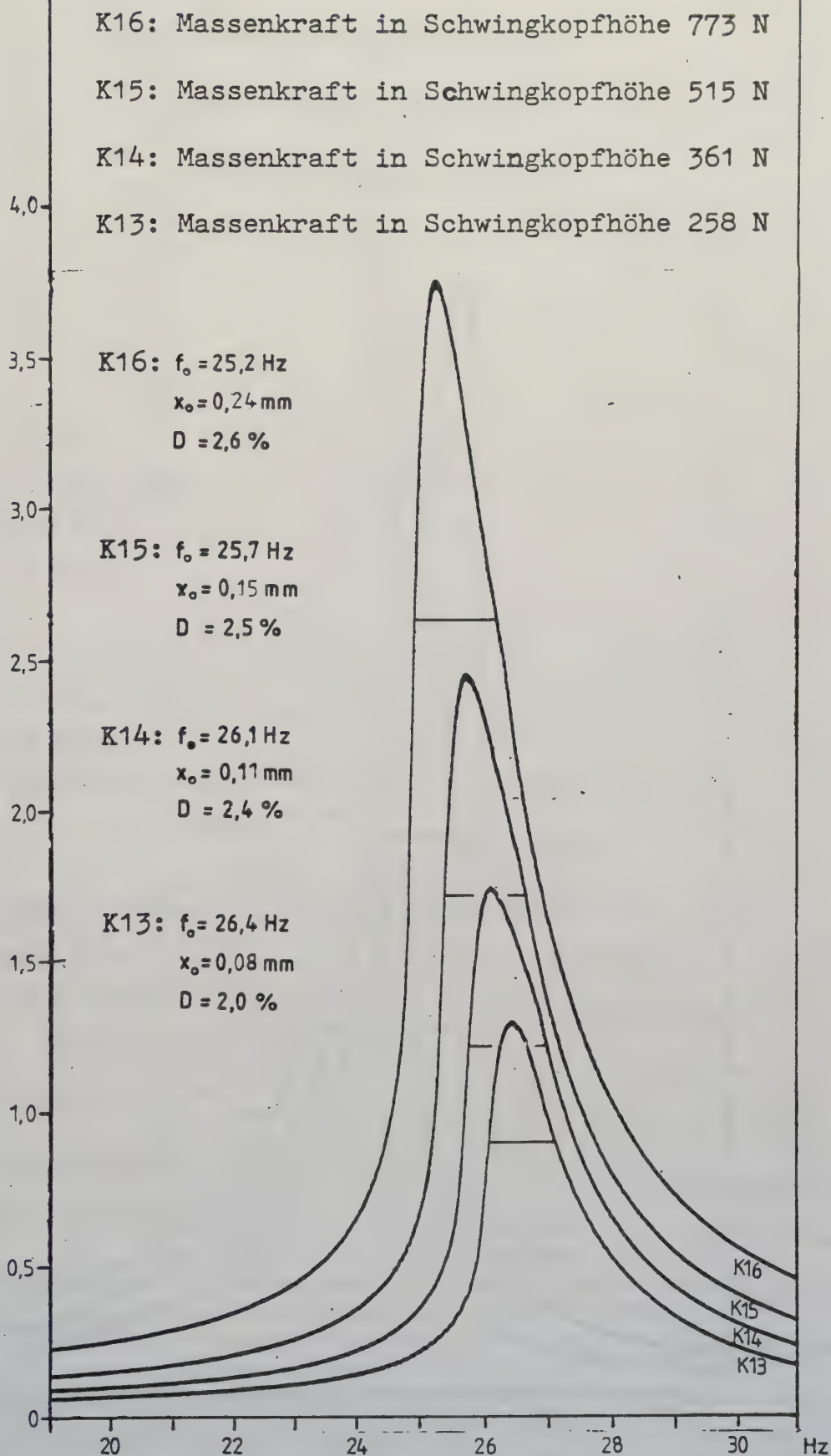
K12

Frequenz [Hz]

| Massenkraft<br>Schwingkopf<br>(N) | Dämpfung<br>(%) | Mauermatte       |                                       |                           | Anregepkt.<br>Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>Z<br>(Ns/m) |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------|
|                                   |                 | Frequenz<br>(Hz) | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> ) | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |                                 |                         |
| 258                               | 2,0*            | 26,4             | 2,201                                 | 1,327                     | 0,08                            | -                       |
| 361                               | 2,4*            | 26,1             | 2,958                                 | 1,804                     | 0,11                            | -                       |
| 515                               | 2,5*            | 25,7             | 3,911                                 | 2,422                     | 0,15                            | -                       |
| 773                               | 2,6*            | 25,2             | 6,017                                 | 3,800                     | 0,24                            | -                       |
| Anregekraft<br>(N)                |                 |                  |                                       |                           |                                 |                         |
| 100                               | 2,5*            | 24,4             | 7,991                                 | 5,213                     | 0,34                            | 1918                    |
| 150                               | 2,6*            | 23,8             | 12,523                                | 8,374                     | 0,56                            | 1791                    |
| 200                               | 2,5*            | 23,4             | 17,293                                | 11,762                    | 0,80                            | 1700                    |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve

Geschwindigkeit [cm/s]

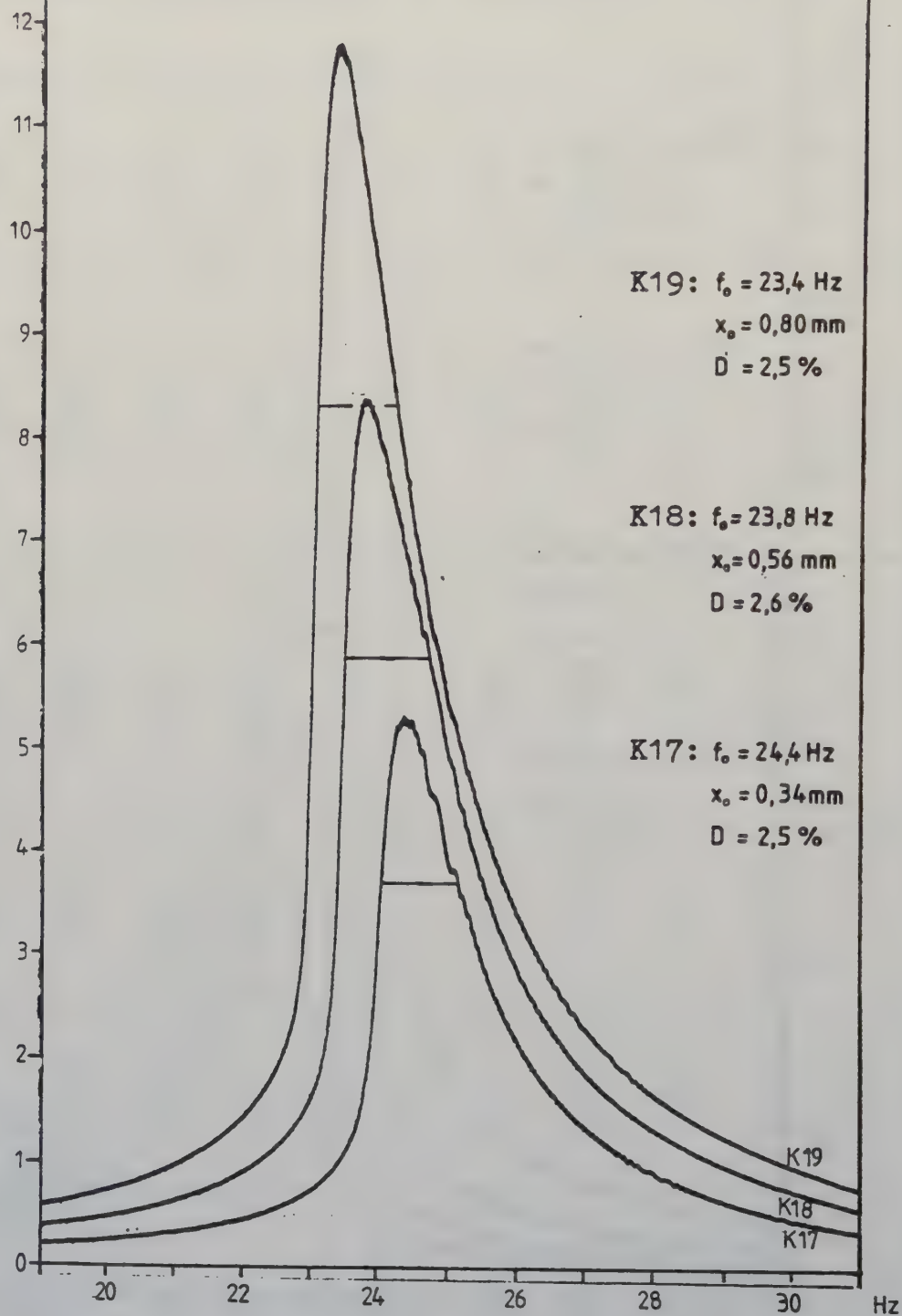


K19: Anregekraft 200 N

K18: Anregekraft 150 N

K17: Anregekraft 100 N

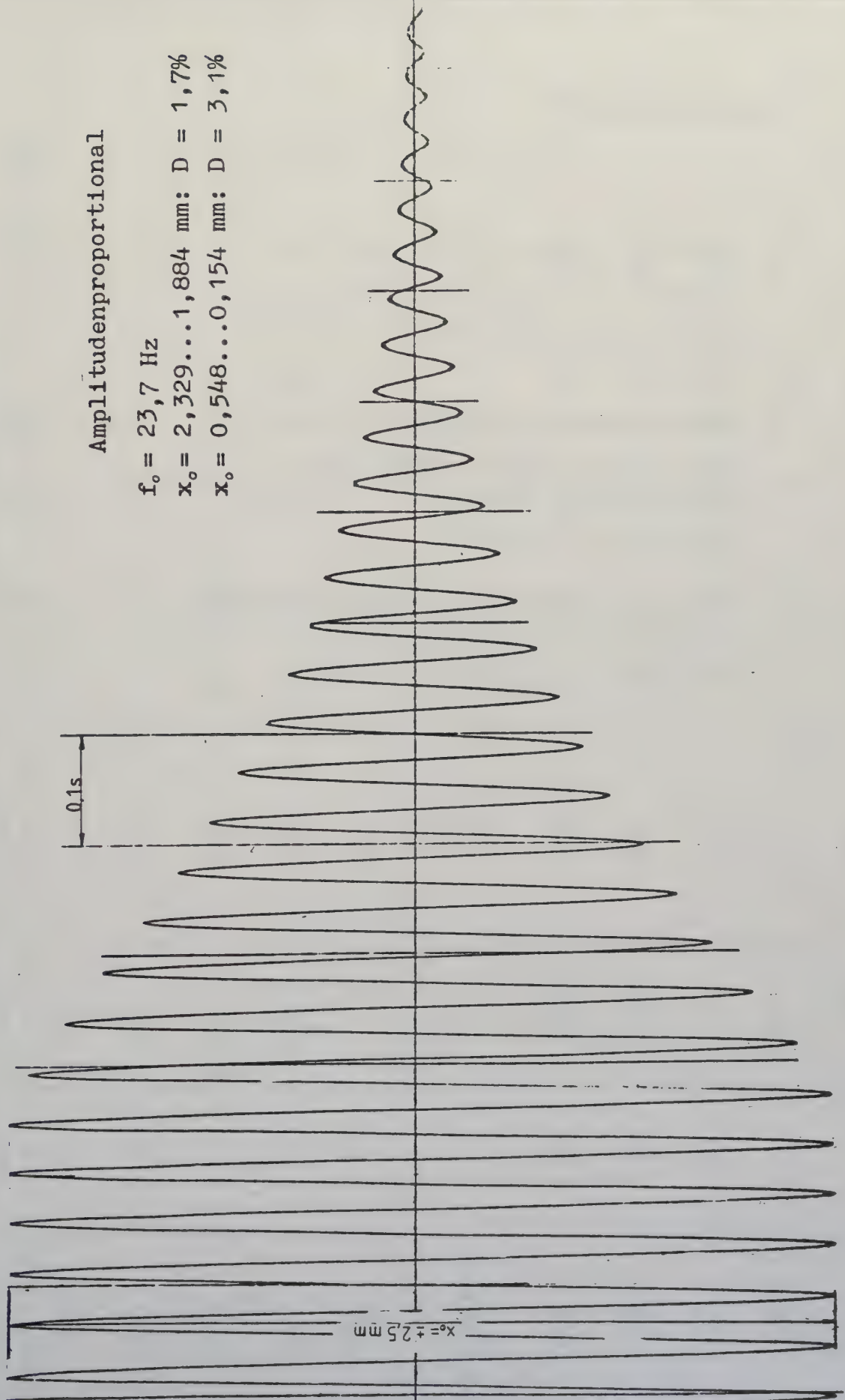
Geschwindigkeit [cm/s]



Meßpunkt: Mauermitte

Amplitudenproportional

$f_0 = 23,7 \text{ Hz}$   
 $x_0 = 2,329 \dots 1,884 \text{ mm}$ :  $D = 1,7\%$   
 $x_0 = 0,548 \dots 0,154 \text{ mm}$ :  $D = 3,1\%$



### 8.3 Triplexstab

|                                                                                                                                      | Seite |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| a) Eichstab, Triplex, Wertetabelle,<br>Anregung über Fundamentblock,<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger,<br>Prüfaufbau Variante 3 | 213   |
| b) Eichstab-Dämpfung Halbwertsbreite/<br>Gewichtskonstante, Anregung bei<br>angekoppeltem Erreger,<br>Prüfaufbau Variante 3          | 217   |
| c) Fundamentresonanz durch Luftfedersystem<br>Anregung am Gestell (oben),<br>Prüfaufbau Variante 3                                   | 224   |

| - 213                             |                  | Eichstab, Triplex<br>Wertetabelle<br>Anregung über Fundamentblock<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                           |      |                   | Prüfaufbau<br>Variante 3 |                         |
|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| Massenkraft<br>Schwingkopf<br>(N) | Dämpfung<br>(%)  | Stabmitte                                                                                               |                           |      | Amplitude<br>(mm) | Impedanz<br>Z<br>(Ns/m)  | Konstante<br>K<br>(1/s) |
|                                   | Frequenz<br>(Hz) | Beschleunigung<br>(m/s <sup>2</sup> )                                                                   | Geschwindigkeit<br>(cm/s) |      |                   |                          |                         |
| 580                               | 2,8*             | 15,2                                                                                                    | 2,39                      | 0,25 | -                 | -                        | -                       |
| 1150                              | 2,8*             | 15,1                                                                                                    | 4,84                      | 0,51 | -                 | -                        | -                       |
| 1730                              | 2,9*             | 15,1                                                                                                    | 7,02                      | 0,74 | -                 | -                        | -                       |
| 2300                              | 3,0*             | 15,0                                                                                                    | 9,33                      | 0,99 | -                 | -                        | -                       |
| 2880                              | 3,0*             | 15,0                                                                                                    | 11,88                     | 1,26 | -                 | -                        | -                       |
| Anregerkraft<br>(N)               |                  |                                                                                                         |                           |      |                   |                          |                         |
| 8,5                               | 2,8*             | 15,2                                                                                                    | 2,39                      | 0,25 | 355,6             | 133,1                    |                         |
| 17,0                              | 2,9*             | 15,1                                                                                                    | 4,65                      | 0,49 | 365,6             | 132,9                    |                         |
| 25,5                              | 2,9*             | 15,1                                                                                                    | 7,02                      | 0,74 | 363,2             | 132,0                    |                         |
| 34,0                              | 3,0*             | 15,0                                                                                                    | 9,33                      | 0,99 | 364,4             | 128,9                    |                         |
| 42,5                              | 3,1*             | 15,0                                                                                                    | 11,59                     | 1,23 | 366,7             | 125,1                    |                         |

\*: Wert aus Halbwertsbreite der Resonanzkurve

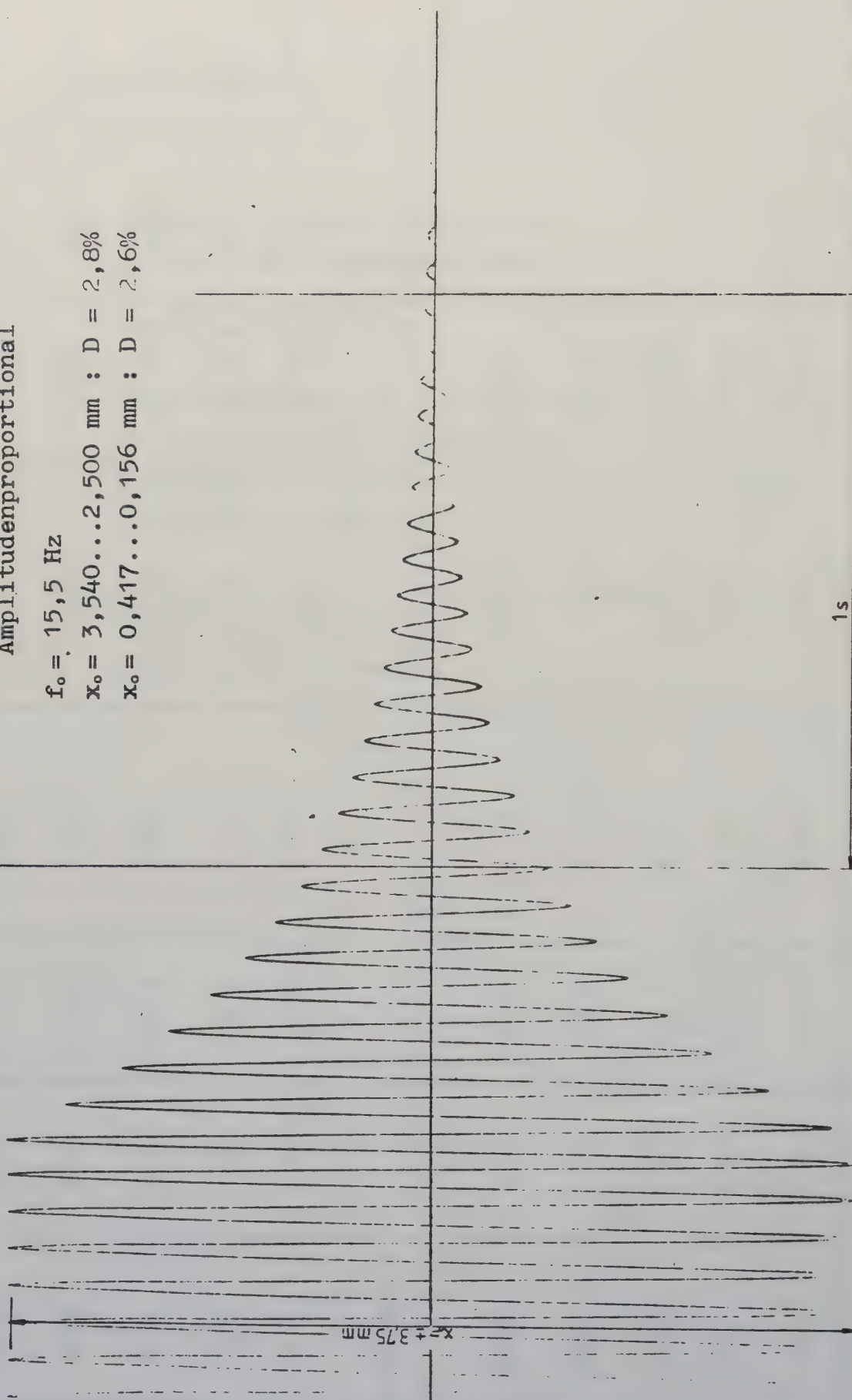
Meßpunkt: Stabmitte

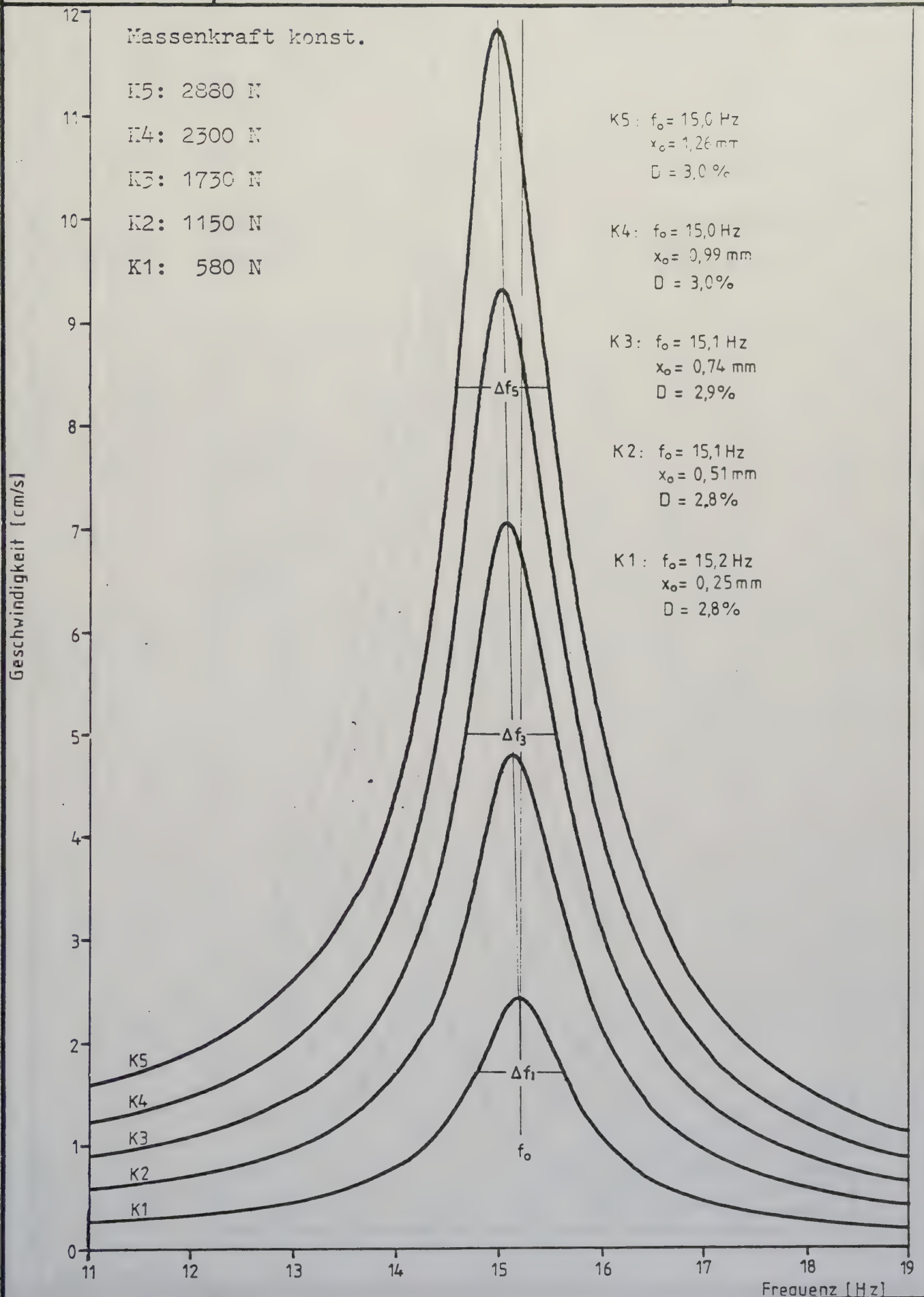
Amplitudenproportional

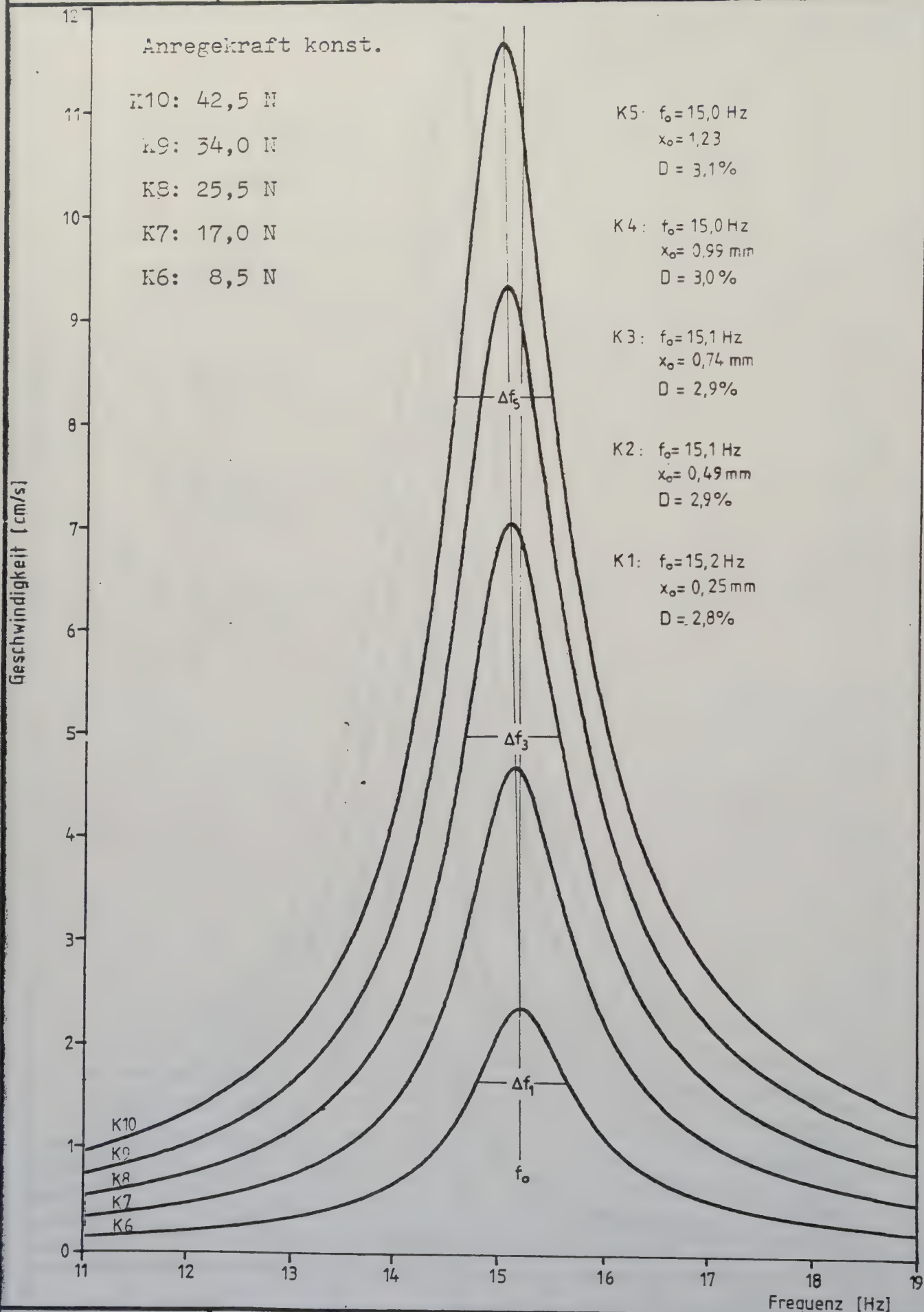
$f_0 = 15,5 \text{ Hz}$

$x_0 = 3,540 \dots 2,500 \text{ mm} : D = 2,8\%$

$x_0 = 0,417 \dots 0,156 \text{ mm} : D = 2,6\%$







| - 217 -             |                  | Eichstab-Dämpfung<br>Habwertsbreite/Gewichtskonstante<br>Anregung bei angekoppeltem Erreger |                                   |                     |             | Prüfaufbau<br>Variante 3 |                                  |
|---------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------|--------------------------|----------------------------------|
| Anregerkraft<br>(N) | Frequenz<br>(Hz) | Dämpfung<br>Kurve ( $\Delta f$ )<br>(%)                                                     | Stabmitte                         |                     | Fundament   | Konstante<br>$K$<br>(kg) | Dämpfung<br>aus $K_{1/2}$<br>(%) |
|                     |                  |                                                                                             | $\ddot{x}$<br>(m/s <sup>2</sup> ) | $\dot{x}$<br>(cm/s) | $x$<br>(mm) | $\dot{x}$<br>(cm/s)      |                                  |
| 20                  | 15,02            | 2,44                                                                                        | 5,65                              | 5,99                | 0,635       | 0,073                    | 2,44                             |
| 40                  | 14,89            | 2,68                                                                                        | 10,76                             | 11,50               | 1,230       | 0,143                    | 2,68                             |
| 60                  | 14,79            | 2,75                                                                                        | 16,04                             | 17,26               | 1,858       | 0,219                    | 2,72                             |
| 80                  | 14,71            | 2,79                                                                                        | 21,00                             | 22,72               | 2,459       | 0,294                    | 2,82                             |
| 100                 | 14,61            | 2,81                                                                                        | 26,18                             | 28,52               | 3,108       | 0,358                    | 2,84                             |
| 120                 | 14,55            | 2,89                                                                                        | 31,15                             | 34,07               | 3,729       | 0,432                    | 2,88                             |
| 160                 | 14,46            | 2,99                                                                                        | 40,62                             | 44,71               | 4,924       | 0,578                    | 3,01                             |
| 200                 | 14,41            | 3,00                                                                                        | 50,60                             | 55,89               | 6,176       | 0,730                    | 3,04                             |
| 250                 | 14,36            | 2,96                                                                                        | 64,15                             | 71,10               | 7,884       | 0,938                    | 2,95                             |
| 300                 | 14,34            | 2,87                                                                                        | 77,77                             | 86,31               | 9,584       | 1,148                    | 2,89                             |

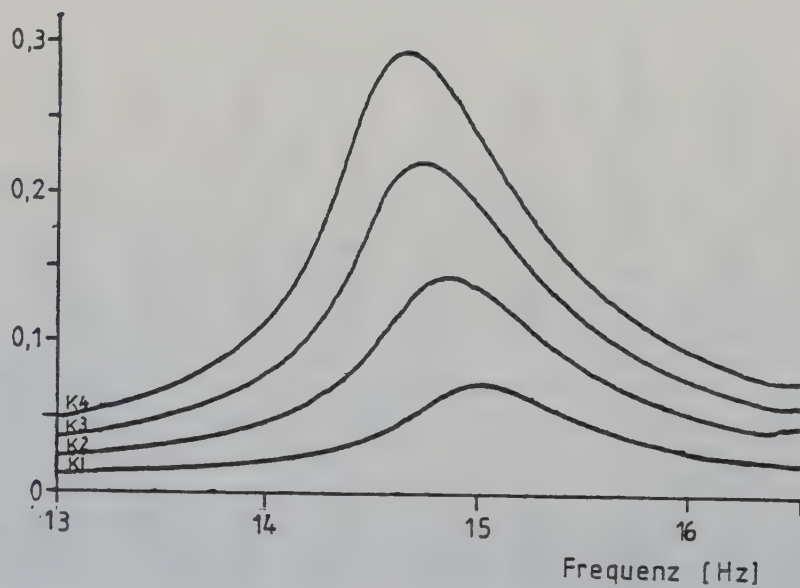
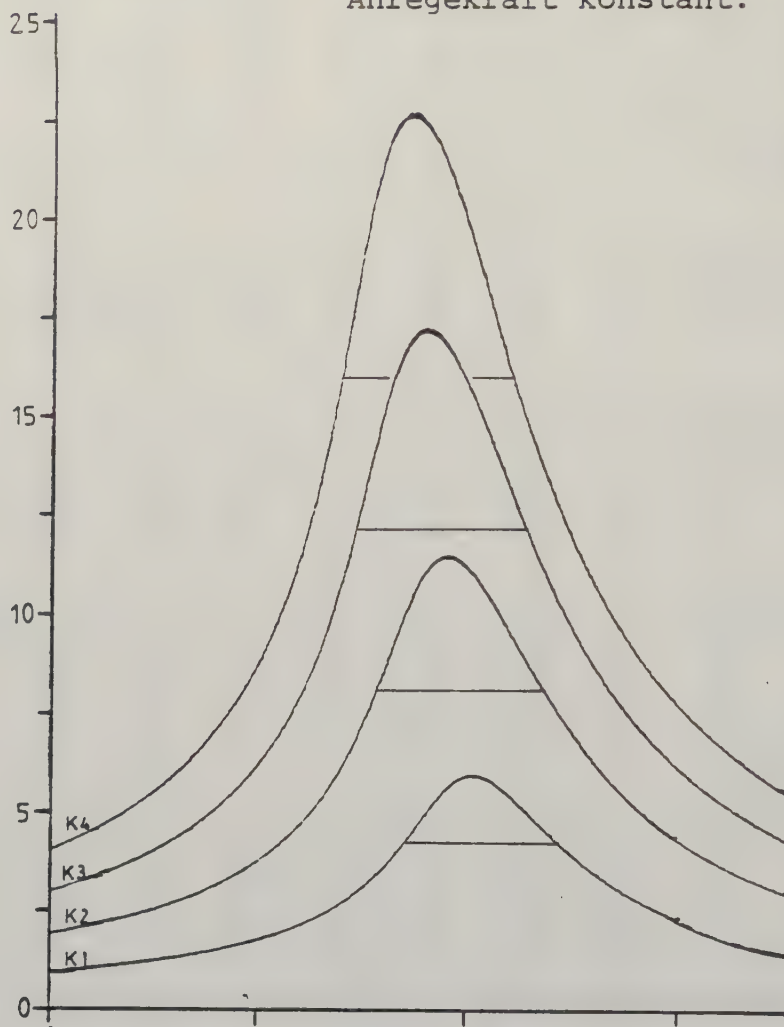
Anregekraft konstant: K4: 80 N

K3: 60 N

K2: 40 N

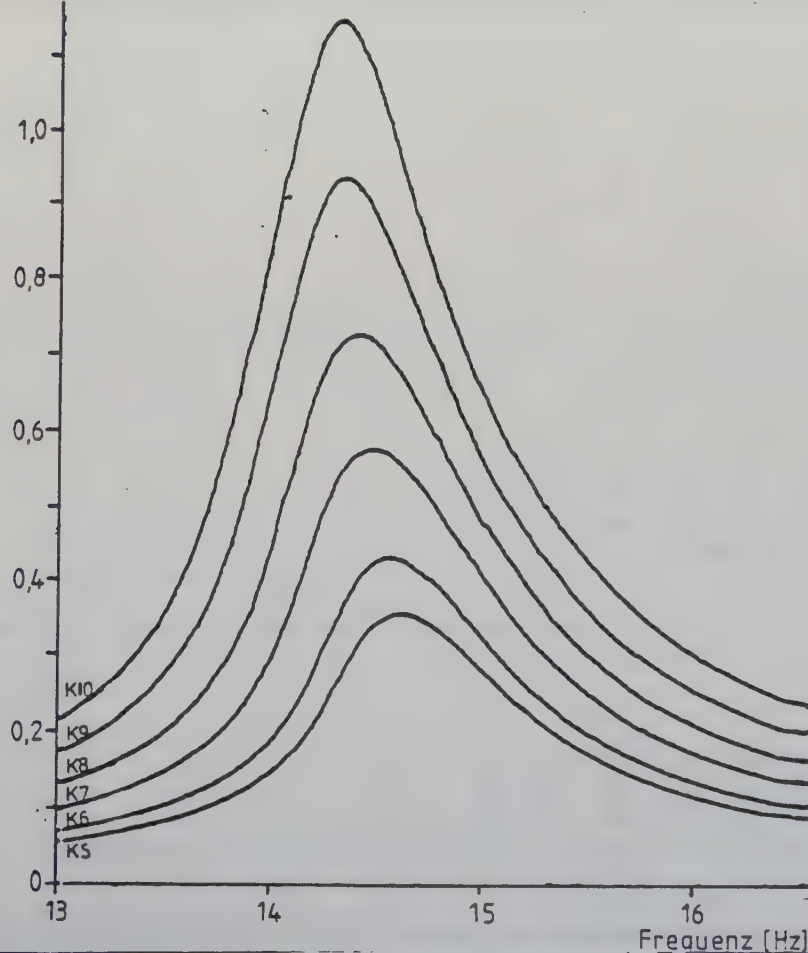
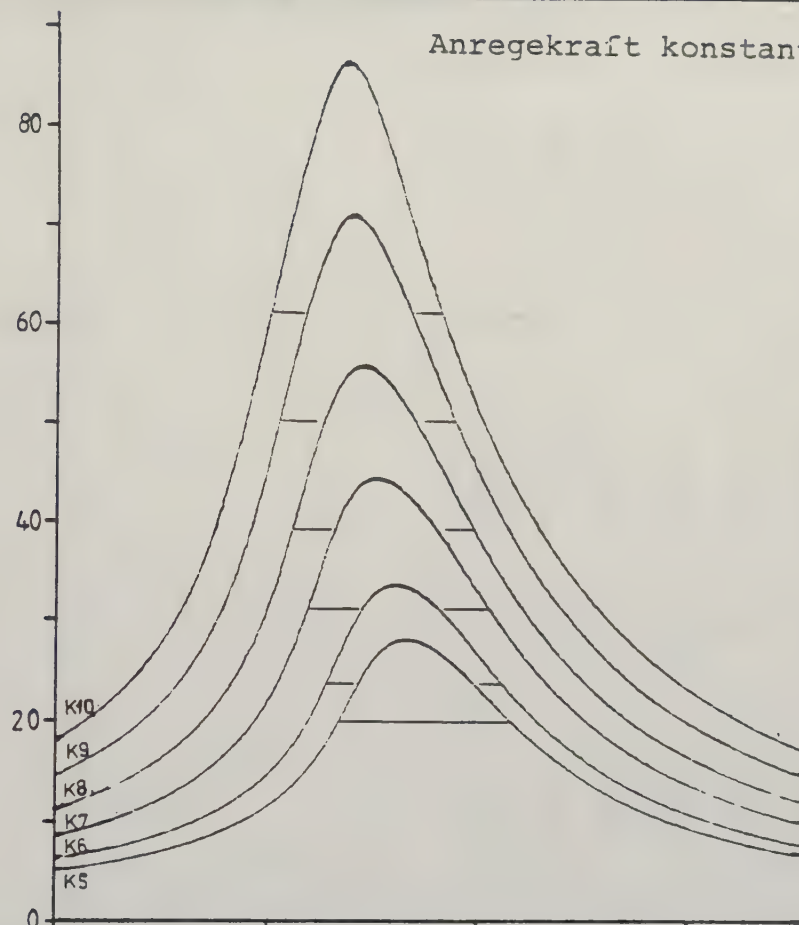
K1: 20 N

Geschwindigkeit (cm/s)



Frequenz [Hz]

Geschwindigkeit (cm/s)

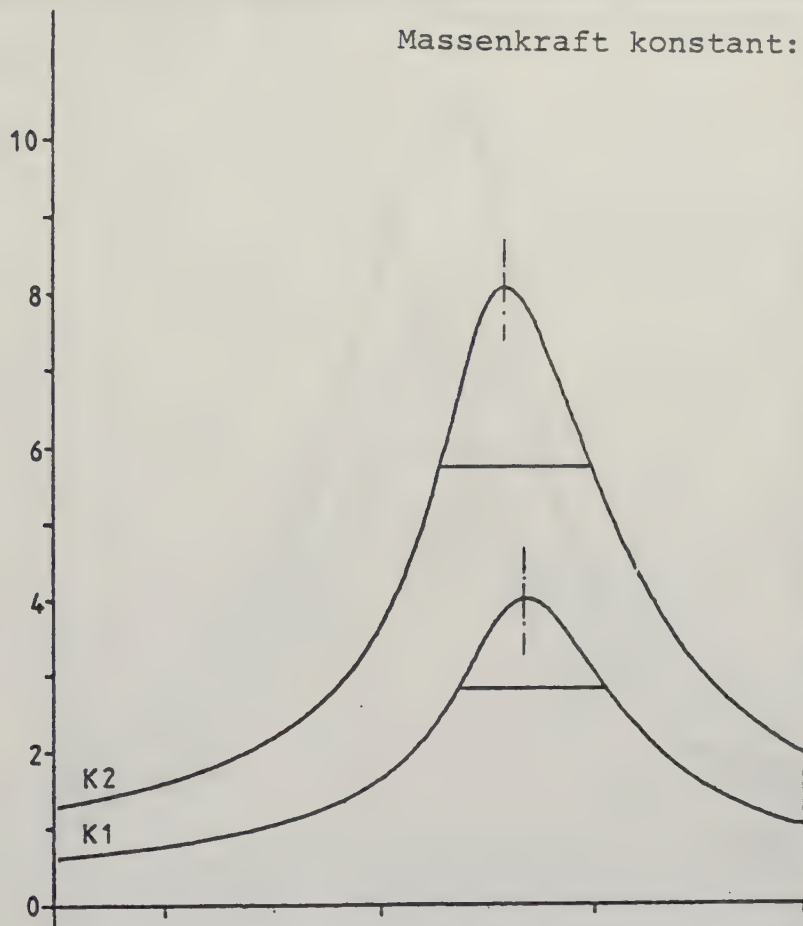


| - 220 -                           |                  | Eichstab-Dämpfung                    |                           | Prüfaufbau                     |                                |
|-----------------------------------|------------------|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
|                                   |                  | Halbwertsbreite/Amplitudenverhältnis |                           | Anregung über Fundamentblock   |                                |
|                                   |                  |                                      |                           | Variante 3                     |                                |
| Massenkraft<br>Schwingkopf<br>(N) | Frequenz<br>(Hz) | Dämpfung<br>Kurve ( f )<br>( % )     | Amplitude<br>Stab<br>(mm) | Amplitude<br>Fundament<br>(mm) | Dämpfung<br>$x_F/x_S$<br>( % ) |
| 840                               | 15,71            | 4,43                                 | 0,410                     | 0,019                          | 2,31                           |
| 1680                              | 15,61            | 4,57                                 | 0,826                     | 0,038                          | 2,30                           |
| 3360                              | 15,46            | 4,73                                 | 1,643                     | 0,076                          | 2,31                           |
| 5040                              | 15,39            | 4,76                                 | 2,533                     | 0,119                          | 2,35                           |
| 6720                              | 15,32            | 4,85                                 | 3,447                     | 0,161                          | 2,34                           |
| 10080                             | 15,28            | 4,91                                 | 4,271                     | 0,203                          | 2,38                           |
| 11760                             | 15,14            | 5,61                                 | 5,939                     | 0,289                          | 2,43                           |

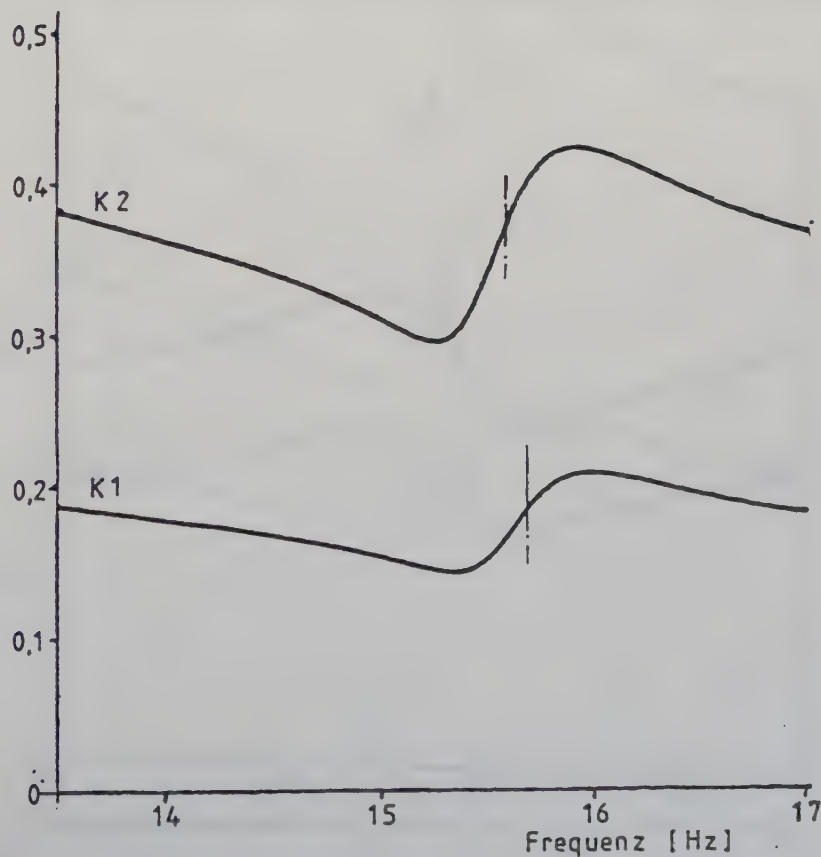
Massenkraft konstant: K2: 1.680 N

K1: 840 N

Geschwindigkeit [cm/s]

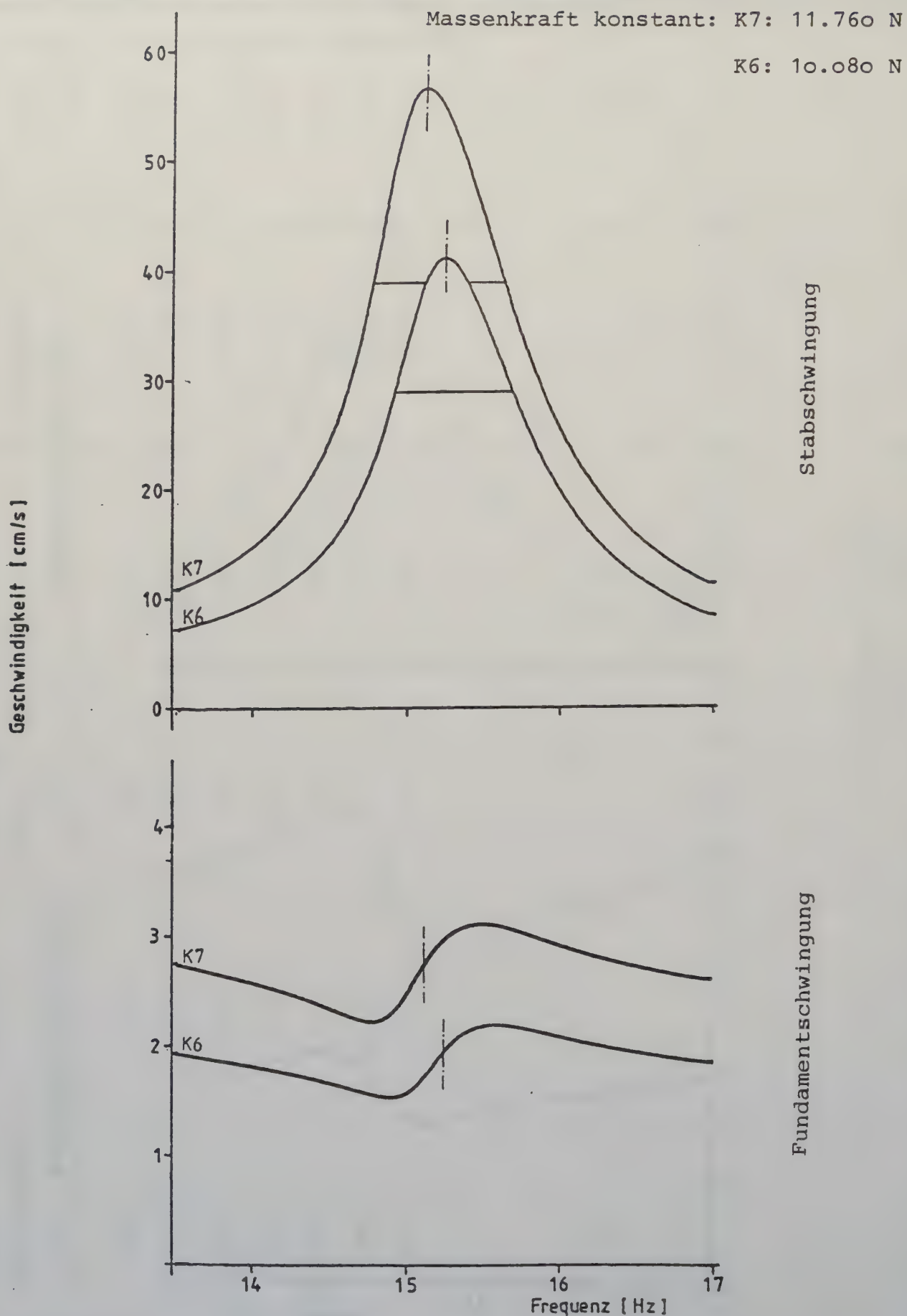


Stabschwingung



Fundamentalschwingung

Frequenz [Hz]

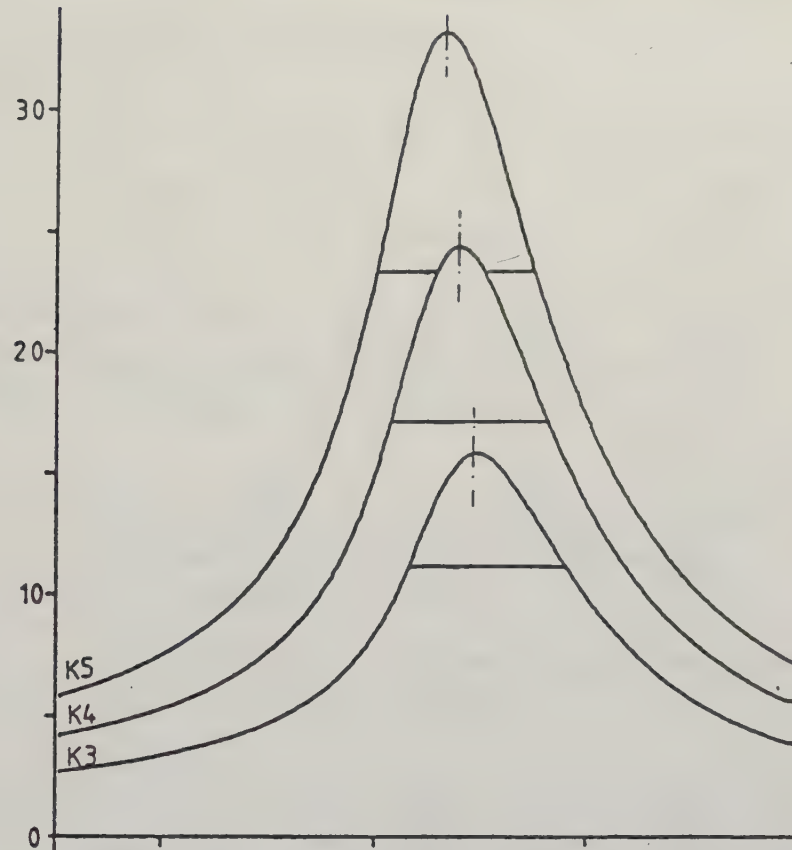


Massenkraft konstant: K5: 6.720 N

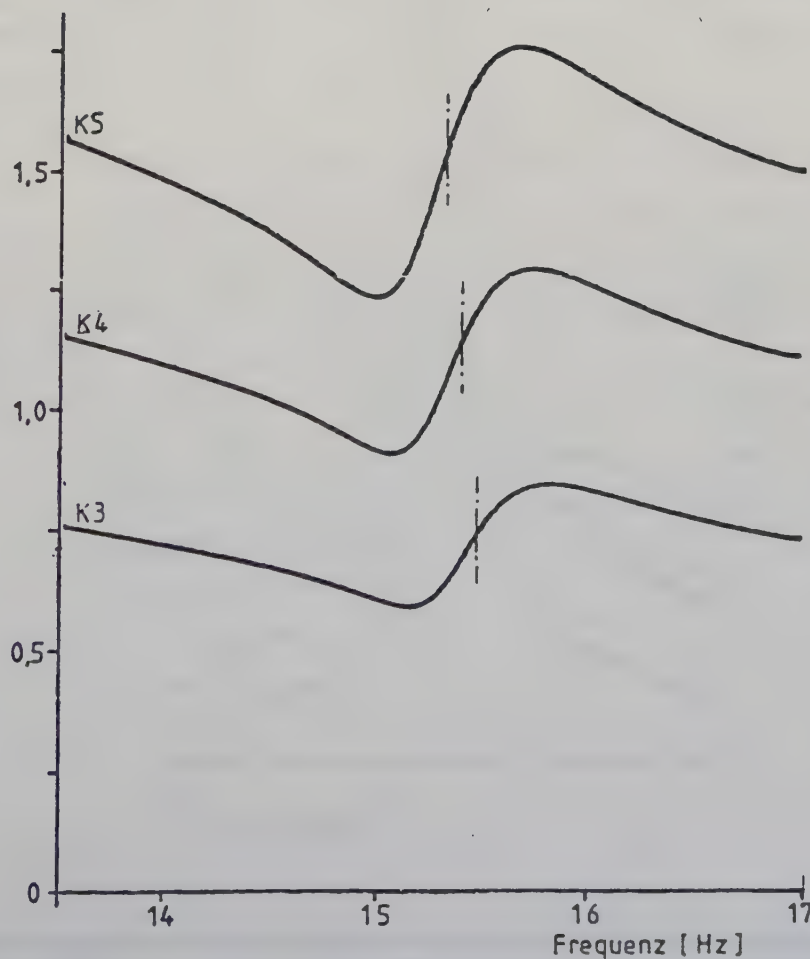
K4: 5.040 N

K3: 3.360 N

Geschwindigkeit [cm/s]



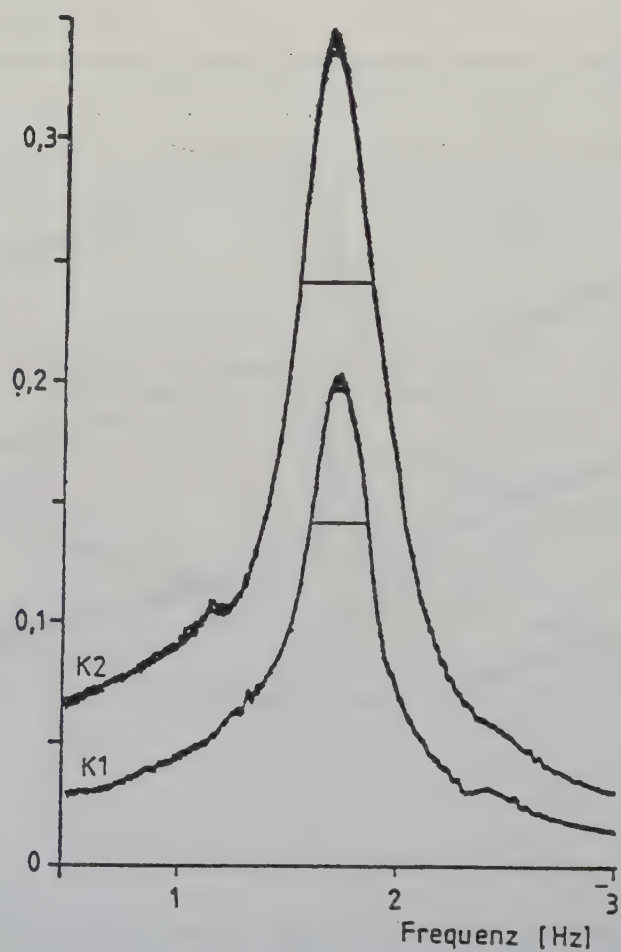
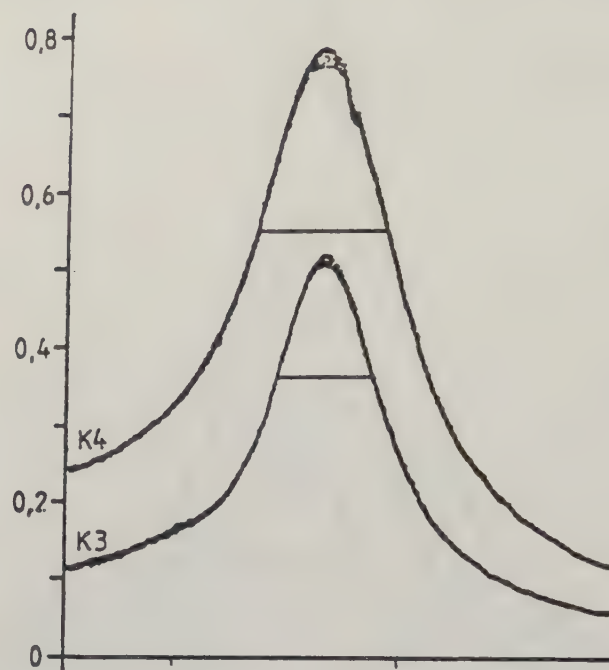
Stabschwingung



Fundamentschwingung

Frequenz [Hz]

Geschwindigkeit [cm/s]



10. Literaturverzeichnis

- /1/ Meyer, O. E.: Zur Theorie der inneren Reibung. J. reine und angew. Math. Bd. 78 (1874) Nr. 2, S. 130/35.
- /2/ Boltzmann, L.: Zur Theorie der elastischen Nachwirkung. Ann. d. Phys. u. Chemie, 6. Reihe, Bd. 7 (1876) 4. Stück, S. 624/54.
- /3/ de Coulomb, C. A.: Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion et sur l'élasticité des fils de métal: application de cette théorie ... Mem. Acad. Sci. Paris 1784. S. 229/69.
- /4/ Berliner, S.: Über das Verhalten des Gußeisens bei langsamen Belastungswechseln. Ann. d. Phys., 4. Folge, Bd. 20 (1906) Nr. 8, S. 527/62.
- /5/ Heyn, E.: Eine Theorie zur Verfestigung von metallischen Stoffen infolge Kaltstreckens. Festschr. der Kaiser Wilhelm-Gesellschaft, S. 121/31, Berlin: J. Springer 1921.
- /6/ Masing, G. u. W. Mauksch: Über das Verhalten von kalt gerecktem Messing bei Zug- und Stauchbelastung. Wiss. Veröffentl. aus dem Siemens Konzern Bd. 5 (1926/27) Nr. 2, S. 142/55.

- / 7/      Kimball, A. L. u. D. E. Lovell: Internal friction in solids. Phys. Rev. Ser. 2 Bd. 30 (1927) Nr. 6, S. 948/59.
  
- / 8/      Becker, E. u. O. Föppl: Dauerversuche zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften. Beziehungen zwischen Baustoffdämpfung und Verformungsgeschwindigkeit. VDI-Forschungsheft Nr. 304, Verein Deutscher Ing. 1928.
  
- / 9/      Wegel, R. L. u. H. Walther: Internal dissipation in solids for small cyclic strains. Physics Bd. 6 (1935) Nr. 4, S. 141/57.
  
- /10/      Lazan, B. J.: Damping of materials and members in structural mechanics. Oxford: Pergamon Press 1968.
  
- /11/      Graham, W. B.: Material damping and its role in linear damping analysis. Inst. for Aerospace Studies, Univ. of Toronto 1973; UNTIA Rev. Nr. 36.
  
- /12/      Goodman, L. E. u. C. B. Brown: Energy dissipation in contact friction: Constant normal and cyclic tangential loading. J. Appl. Mech. Bd. 29 (1962) Nr. 1, S 17/22.
  
- /13/      Maidanik, G.: Energy dissipation associated with gaspumping in structural joints. J. Acoust. Soc. America Bd. 40 (1966) Nr. 5, S. 1064/72.

- /14/ Ungar, E. E.: The status of engineering knowledge concerning the damping of built-up structures. J. Sound Vibr. Bd. 26 (1973) Nr. 1, S. 141/54.
- /15/ Ungar, E. E. u. J. R. Carbonell: On panel vibration damping due to structural joints. AIAA Journ. Bd. 4 (1966) Nr. 8, S. 1385/90.
- /16/ Ottl, D.: Schwingungen mechanischer Systeme mit Strukturdämpfung. VDI-Forsch.-Heft Nr. 603/1981. Düsseldorf: VDI-Verlag 1981.
- /17/ Teichen, K.-T.: Über die innere Dämpfung von Beton. Amtliche Forschungs- u. Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, Universität Stuttgart. Schriftenreihe Heft 38, Stuttgart 1968.
- /18/ Ban, S.: Der Ermüdungsvorgang von Beton. 1933 BAUING. H. 13-14 S. 188-192.
- /19/ Powers, T. C.: Measuring Young's modulus of elasticity by measuring sonic vibrations. 1938 Proc. ASTM V. 38 Part II pp 460-467.
- /20/ Ali, J. u. C. E. Kesler: Rheology of concrete: A view of research. 1965, University of Illinois Bulletin V 62, No. 68 March 1965.
- /21/ Thomson, W. T.: Measuring changes in physical properties of concrete by the dynamic method. 1940 Proc. ASTM 40, pp 1113-1120.

- /22/ Bock, E.: Über den dynamischen E-Modul und die Dämpfung von Betonbalken verschiedener Bewehrung bei Biegungs- und Längsschwingungen. 1939 Diss. Berlin.
- /23/ Denkhaus, G. u. G. Dück: Über das Verhalten von Spannbetonbalken bei Biegeschwingungen, Beton- und Stahlbetonbau, 47. Jahrg., 1952, Heft 3, S. 59-62.
- /24/ Fritz-de la Orta, G. O.: Über das Verhalten von Spannbetonbauteilen bei dynamischen Beanspruchungen, insbesondere bei Erdbeben, Diss. 1958, München.
- /25/ Lenk, H.: Über das Schwingungsverhalten von Spannbeton- und Stahlbetonbalken, 1964 Diss. Stuttgart.
- /26/ Jones, R. u. E. N. Gatfield: Cracking and failure of concrete test specimens under flexural vibratory loading. 1965, Int. Conf. on the Struct. of Concrete.
- /27/ Gaede, K.: Versuche über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druckschwellbeanspruchung. 1962 DAfStB H. 144.
- /28/ Mehmel, A. u. E. Kern: Elastische und plastische Stauchungen von Beton infolge Druckschwell- und Standbelastung. 1962 DAfStB H. 153.

- /29/ Dieterle, R. und H. Bachmann: Versuche über den Einfluß der Rissbildung auf die dynamischen Eigenschaften von Leichtbeton- und Betonbalken. Bericht Nr. 7501-1, Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, Dezember 1979 (36).
- /30/ Ötes, A.: Zur werkstoffgerechten Berechnung der Erdbebenbeanspruchung in Stahlbetonbauteilen. Mitteilung aus dem Inst. f. Massivbau der TH Darmstadt, Heft 25, Verlag W. Ernst und Sohn, Berlin 1985.
- /31/ Fehling, E.U. König, G.: Energiedissipation von Stahlbetonbauteilen unter zyklischer Belastung infolge Verbundhysterese. Abschlußkolloquium zum Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft, Braunschweig, Mai 1988.
- /32/ Mayes, R. L. u. R. W. Clough: A Literature Survey - Compressive, Tensile, Bond and Shear Strength of Masonry, EERC Report No. 75-15, July 1975.
- /33/ Mayes, R. L. u. R. W. Clough: State-of-the-Art in Seismic Shear Strength of Masonry, EERC Report No. 75-21, October 1975.
- /34/ K. Kaplan, B. L. Gabrielsen, W. H. Van Horn: Wall Failures from Explosive Forces.

- /35/      DIN 1311 Blatt 1 und Blatt 2.
- /36/      DIN 1053 Blatt 1
- /37/      DIN 106 Teil 1
- /38/      KTA-Regel 2201.3 Auslegung von Kernkraftwerken  
          gegen seismische Einwirkungen

## N A C H W O R T

=====

Diese Dissertation wurde durch das Entgegenkommen von Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Zerna ermöglicht. Herr Prof. Dr.-Ing. F. Stangenberg übernahm das Referat und förderte den Gang der Arbeit in allen Stadien. Hierfür, wie auch für das stets große Interesse und die Ratschläge, bin ich zu großem Dank verpflichtet.

Herrn Prof. Dr.-Ing. K. H. Schrader danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Die der Arbeit zugrundeliegenden Versuche konnte ich im Schwingungsprüfstand des "Zentralen Labors für Werkstofftechnik" der Brown Boveri & Cie AG, Mannheim, durchführen.

Schließlich danke ich Herrn Ing. (grad.) H. Heinlein für die stetige Förderung, ohne die ein Abschluß der Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Mannheim, im Januar 1989



## Lebenslauf

Peter Buttmann  
geboren am 3. Juli 1946  
in Ludwigshafen

Eltern David Buttmann und Anna Buttmann  
geb. Stephan

Nationalität Deutsch

Schule 1953 bis 1957 Grundschule  
1957 bis 1968 Gymnasium

Studium 1968 bis 1975 Technische Hochschule Darmstadt, Fachrichtung Bauingenieurwesen, mit Abschluß als Diplomingenieur

Berufli. Tätigkeit 1975 Eintritt in die Brown, Boveri & Cie AG. Mannheim, Abteilung Bautechnik, Nukleare Anlagen





